



**(1) Japanese Patent Application Laid-Open No. 5-233592 (1993)**

**“Monte Carlo Simulation Design Method”**

The following is the translation of the columns [0046] through [0052] in  
5 page (20):

The invention is mainly directed to analysis of the source of variance of individual parts, modeling of the resultant variance of the individual parts and modeling of distribution of fitting and tolerance setting of a complete assembly using  
10 variance data of the individual parts.

The invention is further directed to analysis of the fluctuation tolerance of time dependence and throughput dependence of the individual parts in the assembly, to thereafter perform non-linear modeling of the final assembly tolerance. Here, non-linear modeling includes modeling technique of statistical or probability theory  
15 other than “worst condition” type modeling or “sum of square root” type modeling.

It is still another object of the invention to perform analysis and modeling of the fluctuation tolerance of time dependence and throughput dependence of the individual parts in the assembly using Monte Carlo method, to thereafter perform non-linear modeling of the final assembly tolerance using Monte Carlo method.

20 The objects mentioned above are realized by the statistical tolerance setting method of the invention. Statistical measured values of the features of the parts are not invariant by the time. The measured values such as a mean value of diameters and variance of diameters of the individual parts related to the mean value change through a single manufacturing run or manufacturing runs depending on the time and  
25 throughput. In some cases, they may randomly change. According to the

invention, the mean value and standard deviation of the features of the individual parts are mathematically “shifted” or “adjusted” during Monte Carlo simulation. As a result, manufacturing capacity is shifted.

According to the invention, these “shifted” or “adjusted” parameters are used for Monte Carlo simulation to be performed later, to thereby determine discrete values of respective points  $x(i)$ ,  $y(i)$  and  $z(i)$  of each output distribution. After this, the respective points  $x(i)$ ,  $y(i)$  and  $z(i)$  of each output distribution are combined to obtain fitting of each assembly. The statistic of fitting of each assembly is compared with the manufacturing specification.

The distribution of fitting to be used for Monte Carlo simulation of assembled parts is a variable to be modeled by a function  $F$ . Here,  $F$  means function  $F [x, y, z]$  of dimension distributions  $x$ ,  $y$  and  $z$  of the individual parts in the  $i$ -numbered assembly.

The distribution of  $F$  is given by Monte Carlo simulation shown by the following equation:

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

Here, modeling of this distribution is realized by direct substitution. That is, distribution  $F$  is modeled by directly substituting equation as follows:

$$F(1) = F[x(1), y(1), z(1)]$$

$$F(2) = F[x(2), y(2), z(2)]$$

...

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

...

$$F(n) = F[x(n), y(n), z(n)]$$

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平5-233592

(43)公開日 平成5年(1993)9月10日

(51)IntCl.<sup>5</sup>

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

G 0 6 F 15/20

D 7218-5L

15/36

D 8320-5L

// B 2 3 P 21/00

3 0 7 Z 9135-3C

審査請求 有 請求項の数11(全 25 頁)

(21)出願番号 特願平4-271816

(22)出願日 平成4年(1992)10月9日

(31)優先権主張番号 7 9 3 9 8 1

(32)優先日 1991年11月18日

(33)優先権主張国 米国 (U S)

(71)出願人 390009531

インターナショナル・ビジネス・マシー  
ズ・コーポレーションINTERNATIONAL BUSIN  
ESS MACHINES CORPO  
RATIONアメリカ合衆国10504、ニューヨーク州  
アーモンク (番地なし)

(72)発明者 ハワード・リンカーン・ヘック

アメリカ合衆国13760、ニューヨーク州エ  
ンディコット、バインクレスト・ロード  
601

(74)代理人 弁理士 頭宮 孝一 (外4名)

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 モンテカルロ・シミュレーション設計方法

(57)【要約】

【目的】個々の部品の分散の源を分析し、その結果得られる個々の部品の分散をモデル化し、個々の部品の分散データを使用して、完成アセンブリのはめ合いと公差設定の分布をモデル化する。

【構成】部品機能要素A、B、C、Dの測定値の平均値 $\mu$ と、時間依存平均値 $\mu$ に関する部品機能要素測定値の標準分布は、1製造ランにわたる不変量ではなく、時間の経過とスループットの変化に伴ってシフトする。これらの「シフト」または「調節」されたパラメータ群を、モンテカルロ・シミュレーションで使用して、各出力分布の個々の点 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の離散値を決定する。モンテカルロ・シミュレーションの第2段で、出力分布の個々の点 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ を組み合わせて個々のアセンブリ最終はめ合い $F(x(i), y(i), z(i))$ を作る。その後、個々のアセンブリ最終はめ合いの統計値を、製造仕様と比較する。

特徴	$\mu$	$\sigma$	最小	最大
E [N/mm <sup>2</sup> ]	3299.5	99.89	2917.9	3696.7
t [mm]	1.112	0.0083	1.079	1.142
D [mm]	10.968	0.0217	10.678	11.051
d [mm]	7.633	0.0213	7.554	7.708
C [mm]	7.258	0.0085	7.227	7.269
A [mm]	4.000	0.0068	3.975	4.026
B [mm]	3.701	0.0871	3.351	4.020
P [N]	18.876	3.885	3.613	33.879

モンテカルロ・シミュレーションの出力のまとめ

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】各部品がその値の分布付きのパラメータを有する多数部品アセンブリを、事前に設定された組立公差の範囲内で組み立てる方法であって、

- a. 個々の部品のパラメータの統計分布を決定するステップと、
- b. 個々の部品のパラメータの前記統計分布に基づいて個々の多数部品アセンブリ内の個々の部品のはめ合い公差を決定するステップとを含む方法。

【請求項2】個々の部品のパラメータの統計分布を決定するため、個々の部品の各パラメータの1組の推定値を生成するステップを含む、請求項1の方法。

【請求項3】個々の部品のパラメータの統計分布を決定するため、個々の部品の各パラメータの、その平均値に関する、その上限と下限の間の1組の推定値を生成するステップを含む、請求項1の方法。

【請求項4】個々の部品のパラメータの前記統計分布に基づいて個々の多数部品アセンブリ内の個々の部品の公差を決定することによって、多数部品アセンブリの1組のはめ合い公差を生成するステップを含む、請求項1の方法。

【請求項5】各部品がその値の分布付きのパラメータを有する多数部品アセンブリを、事前に設定された組立公差の範囲内で組み立てる方法であって、

- a. 個々の部品のパラメータの統計分布を決定するため、個々の部品の各パラメータの、その平均値に関する、その上限と下限の間の1組の推定値を生成するステップと、
- b. 個々の部品のパラメータの前記統計分布に基づいて個々の多数部品アセンブリ内の個々の部品の公差を決定することによって、多数部品アセンブリの1組の公差を生成し、その後、多数部品アセンブリのはめ合い公差の統計分布を決定するため、多数部品アセンブリのはめ合い公差のうち、その下限と上限の間におさまる部分を決定するステップとを含む方法。

【請求項6】各部品がその値の分布付きのパラメータを有する、部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ を有する多数部品アセンブリを、事前に設定された組立はめ合い公差 $F(x, y, z)$ の範囲内で組み立てる方法であって、

- a. 個々の部品 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ のパラメータの統計分布を決定するため、個々の部品の各パラメータの、その平均値に関する、その上限と下限の間の $n$ 個1組の推定値をモンテカルロ・シミュレーションによって生成するステップと、
- b. モンテカルロ・シミュレーションによって決定される個々の部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の前記分布パラメータをアセンブリに組み合わせることに基づいて、個々の多数部品アセンブリ内の個々の部品 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の組立はめ合い公差 $F(x, y, z)$ を決定することによって、多数部品アセンブリの1組のはめ合い公差 $F$

$(x(i), y(i), z(n))$ を生成し、その後、多数部品アセンブリのはめ合い公差の統計分布を決定するため、多数部品アセンブリの公差のうち、その下限と上限の間におさまる部分を決定するステップとを含む方法。

【請求項7】各部品がその値の分布付きのパラメータを有する、インサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ を有する多数部品アセンブリを、事前に設定された組立はめ合い公差 $F$

$(x, y, z)$ の範囲内で組み立てる方法であって、

- a. 個々のインサート部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ のパラメータの統計分布を決定するため、個々のインサート部品の各パラメータの、その平均値に関する、その上限と下限の間の $n$ 個1組の推定値をモンテカルロ・シミュレーションによって生成するステップと、

b. モンテカルロ・シミュレーションによって決定される個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z$

$(i)$ の前記分布パラメータを $i$ 番目のアセンブリに組み合わせることに基づいて、 $i$ 番目の個々の多数部品アセンブリ内の個々のインサート部品の $i$ 番目の組 $x$

$(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の組立はめ合い公差 $F$

$(x, y, z)$ を決定することによって、多数部品アセンブリの1組のはめ合い公差 $F(x(i), y(i), z(n))$ を生成し、その後、その多数部品アセンブリの組のはめ合い公差 $F(x(i), y(i), z$

$(i)$ の統計分布を決定するため、 $n$ 個の多数部品アセンブリの $i$ 番目の組の公差のうち、その下限と上限の間におさまる部分を決定する、ステップとを含む方法。

【請求項8】各部品がその値の分布付きのパラメータを有する、インサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ を有する多数部品アセンブリを、事前に設定された組立はめ合い公差 $F$

$(x, y, z)$ の範囲内で組み立てる方法であって、

- a. 個々のインサート部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ のパラメータの統計分布を決定するため、各タイプの $n$ 個の個々のインサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ に対する、サンプル空間内での $i=1$ からサンプル数 $n$ までのモンテカルロ・シミュレーションによって、個々のインサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の各パラメータの平均値とその平均値に関する偏差とを、その上限と下限の間で生成するステップと、

b. 個々のインサート部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の個々の各インサート部品について、その寸法を入力することによって、多数部品アセンブリの1組のはめ合い公差 $F(x, y, z)$ を生成し、その後、 $i$ 番目のアセンブリについて、モンテカルロ・シミュレーションによって決定される個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の前記分布パラメータを $i$ 番目のアセンブリに組み合わせることに基づいて、 $i$ 番目の個々の多数部品アセンブリ内の個々のインサート部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の組

立はめ合い公差 $F(x(i), y(i), z(n))$ を決定するステップと、

c. 個々のインサート部品の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ のそれぞれ、およびサンプル空間内の各アセンブリについて、 $i$ を増分し、ステップaおよびステップbを繰り返すステップと、

d. その後、1組の多数部品アセンブリのはめ合い公差の統計分布を決定するため、 $n$ 個の多数部品アセンブリの $i$ 番目の組の公差のうち、その下限と上限の間におさまる部分を決定するステップとを含む方法。

【請求項9】各部品がその値の分布付きのパラメータを有する、部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ を有する多数部品アセンブリを、事前に設定された公差 $F(x, y, z)$ の範囲内で組み立てる方法であって、

a. 個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ および $z(i)$ のパラメータの統計分布を決定するため、各タイプの $n$ 個の個々の部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ に対する、サンプル空間内での $i=1$ からサンプル数 $n$ までのモンテカルロ・シミュレーションによって、個々の部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の各パラメータの平均値とその平均値に関する偏差とを、その上限と下限の間で生成するステップと、

b. 個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の個々の各部品について、そのパラメータを入力することによって、多数部品アセンブリの1組の公差 $F(x, y, z)$ を生成し、その後、 $i$ 番目のアセンブリについて、モンテカルロ・シミュレーションによって決定される個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の前記分布パラメータを $i$ 番目のアセンブリに組み合わせることに基づいて、 $i$ 番目の個々の多数部品アセンブリ内の個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の組立公差 $F(x(i), y(i), z(n))$ を決定するステップと、

c. 個々の部品の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ のそれぞれ、およびサンプル空間内の各アセンブリについて、 $i$ を増分し、ステップaおよびステップbを繰り返すステップと、

d. その後、1組の多数部品アセンブリの公差の統計分布を決定するため、 $n$ 個の多数部品アセンブリの $i$ 番目の組の公差のうち、その下限と上限の間におさまる部分を決定するステップとを含む方法。

【請求項10】各部品がその値の分布を有するパラメータを有する、部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ を有する多数部品アセンブリを、事前に設定された公差 $F(x, y, z)$ の範囲内で組み立てる方法であって、

a. 個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ のパラメータの統計分布を決定するため、各タイプの $n$ 個の個々の部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ に対する、サンプル空間内での $i=1$ からサンプル数 $n$ までのモンテカルロ・シミュレーションによって、個々の部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の各パラメータの、(1)平均値と、(2)シフトされた時

間変動平均値と、(3)シフトされた時間変動平均値に関する偏差とを、その上限と下限の間で生成するステップと、

b. 個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の個々の各部品についてそのパラメータを入力することによって、多数部品アセンブリの1組の公差 $F(x, y, z)$ を生成し、その後、 $i$ 番目のアセンブリについて、モンテカルロ・シミュレーションによって決定される個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の前記分布パラメータを $i$ 番目のアセンブリに組み合わせることに基づいて、 $i$ 番目の個々の多数部品アセンブリ内の個々の部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の組立公差 $F(x(i), y(i), z(n))$ を決定するステップと、

c. 個々の部品の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ のそれぞれ、およびサンプル空間内の各アセンブリについて、 $i$ を増分し、ステップaおよびステップbを繰り返すステップと、

d. 1組の多数部品アセンブリの公差の統計分布を決定するため、その後、 $n$ 個の多数部品アセンブリの $i$ 番目の組の公差のうち、その下限とその上限の間におさまる部分を決定するステップとを含む方法。

【請求項11】パラメータが、機械的はめ合いパラメータ、機械的特性パラメータ、電気的パラメータおよびデジタル・パラメータからなる群から選択されることを特徴とする、請求項10の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、アセンブリの部品や、回路要素の抵抗、キャパシタンス、インダクタンスや、さらには記憶装置内のメモリ・チップの速度など、システムのパラメータの公差設定に関する。具体的に言うと、本発明は、部品の機能要素の統計測定値が、時間不変量ではなく、1製造ランの間に変化するという認識に基づくものである。すなわち、部品機能要素測定値の平均値、および時間依存平均に関する部品機能要素測定値の標準偏差は、1製造ランの間にもさらにはラン間でも一定ではない。製品機能要素の寸法の測定値、すなわち、平均値、標準偏差および工程能力指数はすべて、時間の経過に伴って変化する。時間の経過に伴う機能要素寸法のこの変化に対処するため、平均値および標準偏差、さらにこれらを介して製造能力を、数学的に「シフト」または「調節」する。

【0002】本発明によれば、これらの「シフト」または「調節」されたパラメータ群を、モンテカルロ・シミュレーションで使用して、各出力分布の個々の点 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の離散値を決定する。モンテカルロ・シミュレーションの後続ステップで、個々のアセンブリの最終はめ合い(fit)のために、出力分布の個々の点 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ を組み合わせ

る。その後、個々のアセンブリ最終はめ合いの統計値を製造仕様と比較する。

【0003】組立済み部品の最終はめ合い分布は、関数Fによって変数モデル化される。Fは、個々の部品の寸\*

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

ただし、この分布は、直接代入によってモデル化される。すなわち、分布Fは、下記の直接代入によってモデ※

$$F(1) = F[x(1), y(1), z(1)]$$

$$F(2) = F[x(2), y(2), z(2)]$$

...

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

...

$$F(n) = F[x(n), y(n), z(n)]$$

【0004】

【従来の技術】

#### 1. 電子回路パッケージ

電子パッケージ用の一般的な構造と製造工程は、電子パ  
ッケージの組立てにポジティブ・フォトレジストを使用  
することも含めて、たとえば、ドナルド・セラフィム

(Donald P. Seraphim)、ロナルド・ラスキ (Ronald L. asky) およびチェヨ・リー (Che-Yo Li) 著、Principles of Electronic Packaging, McGraw-Hill Book Company, New York New York (1988) や、ラオ・トゥマラ (Rao R. Tummala) およびユージン・リヤマシェフスキ (Eugene J. Rymaszewski) 著、Microelectronic Packaging Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, New York (1988) に記載されている。これらの文献を、引用に  
よって本明細書に合体する。

【0005】セラフィム他およびトゥマラ他が記述するように、電子回路には、多数の個別電子回路部品、たとえば、数千個ないし数百万個の個別の抵抗、コンデンサ、インダクタ、ダイオード、トランジスタが含まれる。これらの個別回路部品を相互接続して回路を形成し、個々の回路をさらに相互接続して、機能ユニットを形成する。電力と信号の分配は、これらの相互接続を介して行われる。個々の機能ユニットには、機械的な支持と構造的な保護が必要である。電子回路が機能するためには電気エネルギーが必要であり、機能状態に保つためには熱エネルギーを除去する必要がある。チップ、モジュール、回路カード、回路ボードおよびこれらの組合せなどの超小型電子パッケージが、回路部品および回路の保護、収納、冷却および相互接続に使用される。

【0006】単一の集積回路内では、回路部品間および回路間の相互接続、熱放散および機械的保護は、集積回路チップによってもたらされる。このチップを、「第0」実装段と称し、そのモジュール内に収納されたチップを、第1の実装段と称する。

\*法分布  $x, y, z$  の関数  $F[x, y, z]$  である。Fの分布は、下記の関数のモンテカルロ・シミュレーションによって与えられる。

【数1】

※ル化される。

【数2】

【0007】実装には、少なくとももう1つのレベルがある。この第2の実装レベルが、回路カードである。回路カードは、少なくとも4つの機能を実行する。第1に、回路カードが使用されるのは、所望の機能を実行するのに必要な全回路またはビット・カウントが、第0段および第1段パッケージ、すなわちチップおよびチップ・モジュールのビット・カウントを上回るからである。第2に、回路カードは、他の回路要素との信号相互接続を提供する。第3に、第2段パッケージすなわち回路カードは、第1段パッケージすなわちチップまたはモジュールに簡単には集積できない部品用の位置を提供する。これらの部品には、たとえば、コンデンサ、精密抵抗、インダクタ、電気機械式スイッチ、光プラなどが含まれる。第4に、第2段パッケージに取り付けることによって、チップおよびモジュールの熱管理、すなわち、熱放散が実現される。パッケージの主目的が、電氣的相互接続であることに変わりはない。

#### 【0008】2. 実装密度と製造公差

過去には、パッケージは、システム性能を決定する因子ではなかった。ところが、集積回路の開発が急速に進歩したため、役割が入れ替わる結果になった。したがって、バコグル (H.P. Bakoglu) 著 Circuits, Interconnections, and Packaging for VLSI, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. (1990) p.81 によれば、「現在、ハイエンド・コンピュータの全システム遅延の50%が、実装遅延に帰因するものであり、この実装の寄与率は、2000年には80%まで上昇する可能性がある」。

【0009】このため、パッケージ開発者達は、システム性能に対する悪影響を最小にするため、パッケージの寸法を縮小しなければならないという必要に強く迫られている。これは、チップを互いに接近して配置しなければならないことを意味する。さらに、個々のチップの回路密度が増加するにつれて、パッケージの相互接続密度

もそれに応じて増加させる必要がある。相互接続密度が増加すると、配線やパイアなど、パッケージ機能要素の寸法を縮小することが必要になる。寸法を縮小するには、寸法が縮小される機能要素に対する公差をますます小さくする必要がある。

### 【0010】3. 「6σ」パラダイム

寸法縮小が行われるようになるのは、商売上の競争が激化し、費用を低く保ちながら品質と性能を高く保たなければならない時である。これは、欠陥レベルをできる限り低く保たなければならないことを意味する。欠陥レベルの尺度の1つが、「6σ」のエンジニアリングおよび製造である。「6σ」パラダイムの下では、欠陥レベルが、3.4ppm未満に保たれる。これは、実質的にすべての部品、すなわち、百万個のうちの少なくとも999996.6個の部品が、仕様通りに機能しなければならないことを意味する。

【0011】「6σ」パラダイムの要求に合致するには、堅牢な製品の設計および製造工程を達成する並行した設計および製造エンジニアリングが必要である。この製品設計は、自然的に発生する変動に対して堅牢でなければならず、この製造工程は、製造を仕様の範囲内に保つ工程制御を実施しなければならない。

【0012】相乗的に相互作用して「6σ」要件を満たす設計と工程を生み出す方法は、たとえば、マイケル・ハリー (Mikel J. Harry) およびリーグル・スチュワート (Reigle Stewart) 著 Six Sigma Mechanical Design Tolerancing, Motorola, Inc., (1988) に記載されており、この文献を引用によって本明細書に合体する。

「6σ」とは、機械公差設定のレベルである。機械公差設定とは、あるアセンブリに含まれる部品の個々の部品の機械的パラメータが、その公称値から変動し得るが、それでもなお許容できるアセンブリをもたらす範囲を決定することである。

### 【0013】4. 統計的背景

統計的公差分析は、ハリーおよびスチュワートによれば、製造仕様を超える場合の数学的な確率の計算とその後の分析であると定義される。製造可能な部品を設計する際には、機械公差が製造能力と関係付けられる。

【0014】公差設定は、古典的統計学に基づく。したがって、部品のあらゆる母集団が、次式によって定義される算術平均または「平均値」を有する。

【数3】

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$(-4.5\sigma) \leq X_i \leq (+4.5\sigma)$$

母集団平均値から±4.5σの範囲内にある個々の部品がすべて、満足な性能をもたらすことを意味する。

【0018】所与の機械公差を達成する能力を定義するのに使用される性能指数の1つが、「能力指数」であ

ただし、μは、算術平均または「平均値」である。また、部品のあらゆる母集団は、次式によって定義される、平均値からの散乱または逸脱の尺度、すなわち「標準偏差」を有する。

【数4】

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}}$$

ただし、σは、標準偏差であり、X<sub>i</sub>は、アセンブリ内のi番目の部品の測定値である。

【0015】正規分布の母集団のうちで平均値から指定された数の標準偏差以内（またはそれを超える範囲）に含まれる部分の比率は、標準的な研究資料でグラフまたは表にまとめられている。このようなグラフの1つをハリーおよびスチュワートから引用し、図1に示す。このグラフでは、母集団中の比率が縦軸に、平均値から外に向かう正負両方の標準偏差が横軸に示されている。任意の2つの標準偏差x<sub>1</sub>とx<sub>2</sub>の間にある母集団は、x<sub>1</sub>からx<sub>2</sub>までの区間での高さyの定積分に等しい。すなわち、正規分布の母集団の68.4%が、平均値から±1σ（標準偏差）以内にあり、正規分布母集団の95.5%が、平均値から±2σ以内にあり、正規分布母集団の99.73%が、平均値から±3σ以内にある。正規分布母集団の場合、母集団の約3.4ppmが、平均値から±4.5σの外側にある。

【0016】図1に示すように、平均値から±1σの範囲におさまる、母集団の68.4%の寸法範囲は、次式によって与えられる。

【数5】

$$(-1\sigma) \leq X_i \leq (+1\sigma)$$

一方、平均値から±2σの範囲におさまる、母集団の95.46%の寸法範囲は、次式によって与えられる。

【数6】

$$(-2\sigma) \leq X_i \leq (+2\sigma)$$

【0017】これは、「6σ」基準の下では、たとえば時間の経過に伴って、または製造ラン間で平均値が1.5σだけシフトする時に、製造された百万個の部品のうちの3.4個だけが、次式によって与えられる寸法範囲の外にあることを意味し、

【数7】

この指数は、次式によって定義される。

【数8】

$$C_p = (USL - LSL) / 6\sigma$$

ただし、USLは、ある部分の寸法の上限、LSLは、

その部分の寸法の下限である。

【0019】 $C_p$ と、それを定義する項、USL、LSLおよび $\sigma$ （標準偏差）を、やはりハリーおよびスチュワートから引用して図2に示す。図2は、2つの標準分布曲線を示す図であり、分布1は、公称仕様を中心とし、分布2は、平均値から $1.5\sigma$ だけシフトしている。上限USL、下限LSLおよび公称値 $\mu$ が、同図に示されている。距離USL-LSLと、 $\pm 3\sigma$ の広がり、図2に示され識別されている。

【0020】能力指数 $C_p$ が2.0の母集団について検討する。これは、仕様幅USL-LSLが、 $6\sigma$ の分布範囲の2倍の大きさであることを意味する。これは、USLからLSLまでの個々の部品の最大製造公差が、平均値から $\pm 3\sigma$ 以内の個々の部品の母集団の2倍の幅であることを意味する。製造ランに関するパラメータに変化がないと仮定すると、これは、能力指数 $C_p$ が2.0を超えるすべての時間不変処理で「 $6\sigma$ 」基準が満たされることを意味する。

【0021】5. 統計測定値の時間分散

製造工程は、時間不変量ではないことが知られている。公差の時間依存性に関連する能力指数が存在する。これが $C_{pk}$ であり、次式で定義される。

【数9】

$$C_{pk} = C_p (1 - k)$$

ただし、 $k$ は、次式で定義される。

【数10】

$$k = \frac{|\text{公称値} - \text{平均値}|}{(\text{USL} - \text{LSL}) / 2}$$

【0022】統計的平均は、一定ではなく、変数である。歴史的には、これはスループットに依存する。 $k$ は、時間またはスループットに依存する、新しい平均値の公称値からの移動の測定値である。「 $6\sigma$ 」能力とは、製造ランの過程を通じて統計平均値が大きくシフトした場合、たとえば、平均値が $1.5\sigma$ のシフトした場合でも、その工程で製造される百万個の部品のうち許容できない部品が3.4個しかないことを意味する。

【0023】図2の条件2「分布平均が公称値から $1.5\sigma$ シフトした場合」に、新しい条件が示されている。新しい分布の平均値は、右に $1.5\sigma$ だけずれており、 $k$ は、 $|1.5\sigma|/3\sigma$ すなわち0.5であり、 $C_{pk}$ は、1.50である。

【0024】ここでやはりハリーおよびスチュワートから引用した図3を参照すると、ずれがある場合でも、個々の部品のうち公称平均値から $-6\sigma$ を超える（ずれた平均値から $7.5\sigma$ を超える）部分は、実際上0であり、個々の部品のうち公称平均値から $6\sigma$ を超える（ずれた平均値から $4.5\sigma$ を超える）部分は、3.4 p p

mである。これは、 $6\sigma$ 能力係数と機能的に等価である。

【0025】6. アセンブリ設定

上述したように、最終アセンブリ公差または合成公差が3.4 p p m未満の欠陥レベルという機能要件を満たすように、個々の部品および特徴の公差を制御しなければならない。最終アセンブリ用の部品の公差設定のために、様々な方法が知られている。

【0026】a. 最悪条件公差設定

そのような公差設定方法の1つが、「最悪条件公差設定」である。最悪条件公差設定では、個々の部品が、完成アセンブリを機能しない状態にするように選択された許容範囲の端にあると仮定する。「最悪条件」モデルによれば、1組のインサートが、公差内の最大寸法であると仮定され、それらを受けるためのアパーチャが、公差内の最小寸法であると仮定され、完成アセンブリが、機能せずジャムを起こすことになる。

【0027】最悪条件モデルは、一般に慎重にすぎる。これは、不必要に厳格な仕様をもたらし、その結果、通常なら機能するアセンブリが捨てられる可能性がある。

【0028】最悪条件法は、絞りばめまたは過度に大きな間隙の「可能性」を考慮に入れていない。ハリーおよびスチュワートが指摘するように、最悪条件分析は、工程能力とは無関係に、直線の両端だけを考慮している。

【0029】b. 2乗和平方根分析

「2乗和平方根」法では、標準偏差 $\sigma$ と設計公差Tと製造能力 $C_p$ 指数の間に下記の関係がある。

【数11】

$$\sigma = T/3C_p$$

特筆すべき点は、能力指数 $C_p$ が設計公差Tに対して相対的に増加するにつれて、標準偏差 $\sigma$ が低下することである。これは、能力指数 $C_p$ が上がるにつれて、任意の所与の間隙干渉または間隙拘束に遭遇する可能性が下がることを意味する。

【0030】2乗和平方根法は、製造能力指数を利用して、アセンブリ収率のより現実的な指標を与えるが、スループットに関する工程平均値のずれを考慮に入れていない。

【0031】c. 改良2乗和平方根分析

どの2乗和平方根法も、たとえばスループットなど、時間に関する個々の部品平均値寸法のずれを考慮に入れるように改良する必要がある。様々な工具を使用して、2乗和平方根分析の時間またはスループットの不変性を緩和し、2乗和平方根モデルに時間依存性またはスループット依存性の測定値を導入する。

【0032】このような工具の1つが、ハリーおよびスチュワートによって記述された静的2乗和平方根モデルである。このモデルでは、上述の関数 $k$ を利用して、個々の部品の公差に、時間依存関数またはスループット依存関数を乗じる。



【0033】これによって、2乗和平方根モデルは、 \* \* 【数12】

$$Z_F = \frac{F - (N_o - \sum_{i=1}^n N_{o,i})}{\sqrt{(T_o/3C_{o,i})^2 + \sum_{i=1}^n (T_{o,i}/3C_{o,i})^2}}$$

から、

【数13】

※を介して

【数14】

$$Z_F = \frac{F - \sum_{i=1}^n N_i V_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{o,i}/3C_{o,i})^2} \times \frac{F - \sum_{i=1}^n (N_i + W_i k_i T_i) V_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{p,i}/3C_{p,i})^2}}}$$

に変形される。ただし、 $Z_F$ は間隙拘束または間隙限界の修正済みZ変換、 $N_o$ はアパーチャの公称寸法、 $N_i$ はインサートの公称寸法、 $T_o$ はアパーチャの設計公差、 $T_i$ はインサートの設計公差、 $C_{o,i}$ はアパーチャの製造能力指数、 $C_{p,i}$ はインサートの製造能力指数であり、 $k$ は前述の通り、 $W_i$ はシフト・ベクトルである。

【0034】d. 2乗和平方根に基づくモデル

2乗和平方根に基づくモデルを改良すると、最終的には最悪条件モデルまたは改良最悪条件モデルになる。したがって、他の公差設定モデルを使用することが必要になってきた。

【0035】e. モンテカルロ分析

部品公差設定にモンテカルロ分析を使用することは、たとえば、メアリ・ラウジー (Mary E. Rowzee) およびチャード・ホームズ (Richard K. Holmes) 著 "Optimizing Component and Assembly Tolerancing", 1986- ASQC Quality Congress Transactionsに記載されている。

【0036】モンテカルロ分析とは、確率論的モデル化に基づいてアセンブリの変動を決定するのに使用される予測技法である。モンテカルロ分析は、たとえば、US L-LSLの範囲など、個々の部品公差ごとに1つの範囲を確立することによって行われる。数学的に定義された分布にぴったりあてはまる確率抽出をこの範囲内から行って、その応答を評価する。出力値は、従来の統計的方法によって分析する。

【0037】モンテカルロ分析では、乱数発生機能を使用して分布抽出を実行する。したがって、モンテカルロ・シミュレーションでは、デジタル・コンピュータ上で多数のサンプルをシミュレートできる。

【0038】モンテカルロ分析は、2乗和平方根分析や最悪条件分析と同じく、線形法によって複雑なアセンブリを容易にまたは現実的に分析できない場合に特に有用である。

【0039】モンテカルロ分析は、完成アセンブリの製造に費用または時間を要する場合にも有用である。

【0040】f. 変動シミュレーション分析

変動シミュレーション分析とは、モンテカルロ分析を拡張したものである。これは、たとえば、メアリ・ラウジーおよびリチャード・ホームズ著 "Optimizing Component and Assembly Tolerancing", 1986- ASQC Quality Congress Transactions、マーク・クレイグ著 "Predicting Dimensional Variation In Complex Assemblies," Cade nce, July 1989, pp. 59-61および "Avoiding Assembly Misfits," Manufacturing Engineering, June 1990, p. 53-55に記載されている。

【0041】変動シミュレーション分析の例には、正規分布以外の分布用のデータ分析方法の組み込み、正規公差分布以外の公差分布の考案、および、統計的工程データを組み込む能力が含まれる。変動シミュレーション分析は、あるアセンブリを構成する部品の変動と運動学的特性を関係付ける際に特に有益である。

【0042】また、ラウジー他は、工具の摩耗、工程の品質低下や漂動、ロットごとの寸法のばらつき、および、供給業者間での部品のばらつきをアセンブリ設計で考慮に入れることができると報告している。この考察からは、プラントが製造できる最も狭い公差ではなく、設計において合理的に許容される広さの公差がもたらされ

【0043】ラウジー他によって報告された変動シミュレーションのもう1つの貢献が、工程能力データ情報をアセンブリ設計に組み込むことである。この方策によって、基礎となる確率分布と分散度が評価され、シミュレーション・モデルに組み込まれる。

【0044】ライト (Wright) は、AutoCAD リリース10の変動シミュレーション分析モジュールが、モンテカルロ分析を利用して、多数部品アセンブリの多数の部品の寸法をシミュレートし、次いで、多数の多数部品アセンブリを「構築する」と報告している。構築の結果をその後分析する。

#### 【0045】7. 既存の変動公差設定方法の欠点

既存の変動公差設定方法の多くは、個々の部品の分散の源の分析と、個々の部品の分散のモデル化に強い。他の変動公差設定方法は、完成アセンブリのはめ合いと公差設定の現実的な分布をもたらす。しかし、まず時間依存性またはスループット依存性の部品分散をモデル化し、次に最終アセンブリ公差を非線形モデル化する、変動公差設定方法は存在しない。

#### 【0046】

【発明が解決しようとする課題】本発明の主目的は、個々の部品の分散の源を分析し、その結果得られる個々の部品の分散をモデル化し、個々の部品の分散データを使用して、完成アセンブリのはめ合いと公差設定の分布をモデル化することである。

【0047】本発明の他の目的は、アセンブリ内の個々の部品の時間依存性およびスループット依存性の変動公差を分析し、その後、最終アセンブリ公差を非線形モデル化することである。非線形モデル化とは、「最悪条件」または「2乗和平方根」式のモデル以外の、統計的または確率論的モデル化技法を使用することを意味する。

【0048】本発明の他の目的は、モンテカルロ技法を\*

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

ただし、この分布は、直接代入によってモデル化される。すなわち、分布Fは、下記の直接代入によってモデル化される。

$$F(1) = F[x(1), y(1), z(1)]$$

$$F(2) = F[x(2), y(2), z(2)]$$

...

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

...

$$F(n) = F[x(n), y(n), z(n)]$$

【0053】本発明の多段モンテカルロ法を使用することによって、個々の部品の分散の源を分析してその結果得られる個々の部品の分散をモデル化し、また個々の部品の分散データを使用して完成アセンブリのはめ合いお

\*使用して、アセンブリ内の個々の部品の時間依存性およびスループット依存性の変動公差を分析してモデル化し、その後、さらにモンテカルロ分析を使用して、最終アセンブリ公差を非線形モデル化することである。

#### 【0049】

【課題を解決するための手段】本発明の上記その他の目的は、本発明の統計的公差設定方法によって達成される。部品特徴の統計的測定値は、時間不変量ではない。直径の平均値や、その平均値に関する個々の部品の直径の分散などの測定値は、1製造ランの間または製造ラン間で、時間またはスループットに依存して、場合によってはランダムに変化する。本発明の方法によれば、時間の経過に伴う特徴寸法のこの変化を考慮に入れるため、モンテカルロ・シミュレーションの際に、個々の部品特徴の平均値および標準偏差を、数学的に「シフト」または「調節」させる。これによって、製造能力がシフトする。

【0050】本発明によれば、これらの「シフト」または「調節」されたパラメータ群を、後のモンテカルロ・シミュレーションに使用して、各出力分布の個々の点x(i)、y(i)、z(i)の離散値を決定する。その後、出力分布の個々の点x(i)、y(i)、z(i)を組み合わせ、個々のアセンブリの最終はめ合いを得る。その後、個々のアセンブリの最終はめ合いの統計を、製造仕様と比較する。

【0051】組立済み部品のモンテカルロ・シミュレーションに使用される最終はめ合い分布は、関数Fによってモデル化される変数である。Fは、i番目のアセンブリの個々の部品の寸法分布x、y、zの関数F[x, y, z]である。

【0052】Fの分布は、下記の関数のモンテカルロ・シミュレーションによって与えられる。

#### 【数15】

※ル化される。

#### 【数16】

および公差設定の分布をモデル化することができる。

【0054】本発明のモンテカルロ法では、最終アセンブリ公差を非線形モデル化する。非線形モデル化とは、「最悪条件」または「2乗和平方根」式のモデル以外

の、統計的または確率論的モデル化技法を使用することを意味する。

【0055】本発明の多段モンテカルロ・モデル化法では、モンテカルロ技法を利用して、まずアセンブリ内の個々の部品の時間依存性およびスループット依存性の変動公差を分析し、モデル化する。その後、第2段階で、モンテカルロ分析を使用して、第1のモンテカルロ・シミュレーションでモデル化された個々の部品の集合から、個々の部品をランダムに選択し、最終アセンブリ公差を非線形モデル化する。

【0056】本発明は、本明細書に添付の図面を参照することによって、より完全に理解されよう。

【0057】

【実施例】

「シフト」または「調節」された平均値と標準偏差を用いる2段モンテカルロ・シミュレーション

本発明のモンテカルロ公差設定法では、アセンブリの個々の部品の特性を決定する能力を使用する。その後、次のモンテカルロ・シミュレーション・ステップで部品の特性を組み合わせ、アセンブリの特性を得る。

【0058】部品パラメータ

部品の機能要素の統計平均値は、時間不変量ではない。直径の平均値やその平均に関する個々の部品直径の分散\*

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

ただし、この分布は、直接代入によってモデル化される。すなわち、分布Fは、下記の直接代入によってモデル化される。

$$F(1) = F[x(1), y(1), z(1)]$$

$$F(2) = F[x(2), y(2), z(2)]$$

...

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

...

$$F(n) = F[x(n), y(n), z(n)]$$

【0062】個々の部品パラメータx、y、zの値と、その個々のサンプル値x(i)、y(i)、z(i)には、調節済みの平均値と調節済みの標準偏差を利用する。個々の部品の調節済みの平均値および調節済みの標準偏差の計算は、「従来の技術」で説明した。

【0063】動的平均値シフト

上述したように、動的2乗和平方根法で使用される動的平均値のシフトは、次式に従って標準偏差を調節することによって、ランダムな変動およびスループット依存性

$$\mu_{adj} = \text{公称値} = (USL + LSL) / 2$$

ただし、 $\mu_{adj}$ は調節済みの標準偏差、USLとLSLは上記と同様である。

【0065】これによって、ランダムな変動やスループット依存性の変動など、工程平均の変動を考慮に入れるため、分布の広がりを増加させる。

\*などの測定値は、製造ランの間に、時間またはスループットに依存して変化する。本発明の方法によれば、時間の経過に伴うこの機能要素の寸法の変化を考慮に入れるため、モンテカルロ・シミュレーションの際に、個々の部品機能要素の平均値、標準偏差および製造能力指数指数を、数学的に「シフト」または「調節」させる。

【0059】アセンブリ・パラメータ

本発明によれば、これらの「シフト」または「調節」されたパラメータ群を、後のモンテカルロ・シミュレーションに使用して、各出力分布の個々の点x(i)、y(i)、z(i)の離散値を決定する。その後、出力分布の個々の点x(i)、y(i)、z(i)を組み合わせ、個々のアセンブリの最終はめ合いを得る。その後、個々のアセンブリの最終はめ合いの統計を、製造仕様と比較する。

【0060】組立済み部品のモンテカルロ・シミュレーションに使用される最終はめ合い分布は、関数Fによってモデル化される変数である。Fは、i番目のアセンブリの個々の部品の寸法分布x、y、zの関数F[x, y, z]である。

【0061】Fの分布は、下記の関数のモンテカルロ・シミュレーションによって与えられる。

【数17】

※ル化される。

【数18】

の変動を考慮に入れたものである。

【数19】

$$\mu_{adj} = (USL - LSL) / 6C_p$$

ただし、 $\mu_{adj}$ は調節済みの標準偏差、USLは前述の分布の上限、LSLは前述の分布の下限である。

【0064】調節済みの平均値は、下記の公称値に等しい。

【数20】

【0066】静的平均値シフト

それとは対照的に、ハリーおよびスチュワートの静的平均値シフトを採用してモンテカルロ環境で動作させることもできる。静的平均値シフトは、次式に従って平均値を調節することによって、スループット依存性のシフト

およびずれを考慮に入れるものである。

$$\mu_{adj} = \text{公称値} + [V(C_p - C_{pk})(USL - LSL)] / 2C_p$$

ただし、Vは、平均値シフトの方向を示すシフト・ベクトルである。その後、次式に従って標準偏差を計算する。

#### 【数22】

$$\sigma_{adj} = (USL - LSL) / 6C_p$$

【0067】静的平均値シフトでは、持続的な平均値シフトを考慮に入れるため、分布の位置をシフトさせる。

#### 【0068】個々の部品の分布の生成

どちらの方法でも、調節済みの標準偏差と調節済みの平均値を使用して、各入力変数の乱数正規分布を生成する。これは、確立された分布を生成するルーチンを使用して行われる。

#### 【0069】アセンブリ分布の生成

入力変数と出力変数の関係を記述するモデル式を使用して、各出力分布の離散値を計算する。

#### 【0070】擬似コード

下記の擬似コードの例は、出力変数を計算する方法の例である。

```
if Type = DYNAMIC then
Mean = (USL + LSL)/2
Std_Dev = (USL - LSL)/6Cpk
end-if
if Type = STATIC then
Mean = [(USL + LSL)/2][1+V(1-Cp/Cpk)]
Std_Dev = (USL - LSL)/6Cp
end-if
標準正規偏差(Z)を計算する
Input_Variable[i] = Mean + Z * Std_Dev
end-for
モデル式を評価する
end-for
end-for
Mean, Std_Dev, Cp, Cpkおよび
欠陥率の推定値を計算する
end-for
```

【0071】上記の擬似コードに含まれる入力変数は、次の通りである。

C<sub>p</sub> 各入力変数に対する工程能力  
C<sub>pk</sub> 平均値を公称値から変化させる変動の源を考慮に入れた、各入力変数に対する工程能力  
LSL 各入力変数の分布の下限  
USL 各入力変数の分布の上限  
Type 各入力変数についてそれぞれ、分布平均値のシフトが“Dynamic(動的)”であるか“Static(静的)”であるかを示す変数  
Vector 静的シフトの場合に、平均値が正方向にシフトされる(Vector = 1)のか、負方向にシフトされる(Vector = -1)のかを示す変数

\* \* 【数21】

Model\_Equation 各モデル式について、その式を表す文字列。この式は、Expression\_Evaluator(式評価機能)の入力として使用される。

Sample\_Size 変数ごとに生成されるサンプルの数  
【0072】出力変数は次の通りである。

Input\_Variable 各入力変数について、生成されるサンプル点を保持する実数値の列。

10 Output\_Variable 各出力変数について、生成されるサンプル点を保持する実数値の列。

【0073】上記の擬似コードでは、下記の局所変数が使用される。

i forループ・カウンタ

Z Standard\_Normal\_Deviate\_Generator(標準正規偏差生成)

ルーチンから戻る際に、ランダムに生成された標準正規偏差の値を保持する変数。

Mean 分布の上下限、工程能力および分布の型式(静的または動的)に基づいて計算される分布の平均値。

Std\_Dev 分布の上下限、工程能力および分布の型式(静的または動的)に基づいて計算される分布の標準偏差。

【0074】上記の擬似コードによって記述される方法では、2つの標準ルーチンを利用している。一方のルーチンは、標準正規偏差生成機能であり、他方は、式評価機能である。

【0075】標準正規偏差生成機能では、このルーチン30を呼び出すたびに、ランダムに発生される値が作成され、この値が標準分布に写像される。標準正規分布とは、平均値が0に等しく、標準正規偏差が1に等しいガウス分布を意味する。もちろん、本発明のモンテカルロ法では他の生成機能と共に他の分布も使用できることを理解されたい。

【0076】式評価機能は、呼出しに含まれる数式によって指定された計算の結果を生成する。本発明のモンテカルロ法は、式評価機能の選択とは独立に機能する。

【0077】この擬似コードで特に留意すべき点は、このモンテカルロ・シミュレーションが2段シミュレーションであり、第1段では部品特性、すなわち、前の議論ではx(i)、y(i)、z(i)の分布を評価し、第2段ではアセンブリ特性、前の議論ではF(x(i)、y(i)、z(i))を評価することである。

【0078】このモンテカルロ・シミュレーションの第1段には、下記のループが含まれる。

```
if Type = DYNAMIC then
Mean = (USL + LSL)/2
Std_Dev = (USL - LSL)/6Cpk
50 end-if
```

```

if Type = STATIC then
Mean = [(USL + LSL)/2][1+V(1-Cp/Cpk)]
Std_Dev = (USL - LSL)/6Cp
end-if
標準正規偏差(Z)を生成する
Input_Variable[i] = Mean + Z * Std_Dev

```

一方、このモンテカルロ・シミュレーションの第2段には、下記のループが含まれる。

モデル式を評価する

```
end-for
```

```
end-for
```

また、第2段では、下記の結果がループによって報告される。

Mean, Std\_Dev, C<sub>p</sub>, C<sub>pk</sub>および

欠陥率推定値を計算する

```
end-for
```

#### 【0079】工程の記述

本発明の2段モンテカルロ組立公差設定方法は、インサート部品x、y、zを有する多数部品アセンブリの組立に特に有用である。インサート部品は、たとえば遊星歯車などのかみあう歯車でよい。また、表面実装装置に挿入する集積回路チップのピンや、回路カードまたは回路ボード上の表面パッドに接着する集積回路チップでもよい。

【0080】インサート部品は、事前に設定された組立はめ合い公差F(x, y, z)の範囲内で設置、挿入、接着または接合しなければならない。前記インサート部品x、y、zはそれぞれ、はめ合い決定パラメータ群を有する。すなわち、これらのパラメータの相互作用で、適当なはめ合い、機械的干渉、または大き過ぎる間隙が生じるか否かが決まる。1組のインサート部品のはめ合い決定パラメータは、平均値に関する値の分布を有する。

【0081】本発明の方法によれば、モンテカルロ・シミュレーションは、サンプル空間内の各タイプのn個1組の個々のインサート部品x、y、zに対して使用される。すなわち、各インサート部品x、y、zについて、i=1からサンプル数nまで、モンテカルロ・シミュレーションを使用して、各はめ合い決定パラメータの統計的分布を生成する。この分布は、個々のインサート部品x、y、zの各はめ合い決定パラメータについて、製造能力によって定義される上限と下限の間で、平均値とその平均値に関する偏差を有する。

【0082】個々のインサートのはめ合い決定パラメータの各組を適当に組み合わせて、多数部品アセンブリのはめ合い公差F(x, y, z)を生成する。これは、個々のインサート部品のi番目の組x(i)、y(i)、z(i)の個々の各インサート部品の適当な各はめ合い決定パラメータの数値を適当なモデルに入力することに

よって行われる。このモデルは、3次元CAD/CAMモデルでよい。その後、i番目のアセンブリのモデルを使用して、i番目の個々の多数部品アセンブリの個々のインサート部品のi番目の組x(i)、y(i)、z(i)の製造はめ合い公差F(x(i), y(i), z(n))を決定する。この決定は、モンテカルロ・シミュレーションによって決定される、個々のインサート部品のi番目の組x(i)、y(i)、z(i)の個々のパラメータを、i番目のアセンブリに組み合わせることに基づく。

【0083】その後、カウンタiを増分し、サンプル空間内の個々のインサート部品の組x(i)、y(i)、z(i)のそれぞれおよび各アセンブリについて、モンテカルロ・シミュレーションを繰り返す。このモンテカルロ・シミュレーションの結果を使用して、n個の多数部品アセンブリのi番目の組の公差F(x, y, z)の、適当に定義された上限と下限の間におさまる部分を決定する。

【0084】その後、n個の多数部品アセンブリの組のはめ合い公差の統計的分布を使用して、部品製造公差を設定し、あるいはアセンブリまたはそのアセンブリの個々の部品を設計し直すことができる。

#### 【0085】例

本発明の2段モンテカルロ・シミュレーションは、下記の2つの例によって理解することができる。

#### 【0086】例1

基板11と集積回路チップ31を含む超小型電子回路パッケージ1の測定値を、図4に示す。図4には、基板11上のはんだパッド13と、集積回路チップ31上のはんだボール33が、はんだパッド13とはんだボール33を位置決めするための1対のx y格子と共に示されている。これらの機能要素を使用して、公差設定の対象となる変数を表す。

【0087】図4に示すように、各はんだパッド13は、x座標[x(i)<sub>1</sub>, x(i)<sub>2</sub>, x(i)<sub>3</sub>, x(i)<sub>4</sub>, x(i)<sub>5</sub>]とy座標[y(i)<sub>1</sub>, y(i)<sub>2</sub>, y(i)<sub>3</sub>, y(i)<sub>4</sub>, y(i)<sub>5</sub>]による一義的なアドレスを有する。同様に、各はんだボール33は、x座標[x(i)<sub>1</sub>, x(i)<sub>2</sub>, x(i)<sub>3</sub>, x(i)<sub>4</sub>, x(i)<sub>5</sub>]とy座標[y(i)<sub>1</sub>, y(i)<sub>2</sub>, y(i)<sub>3</sub>, y(i)<sub>4</sub>, y(i)<sub>5</sub>]による一義的なアドレスを有する。

【0088】また、図4に示すように、はんだパッド13の中心の実際の位置は、公称値から、x方向にTx<sub>n</sub>(i)=x<sup>^</sup><sub>n</sub>(i)-x<sub>n</sub>、y方向にTy<sub>n</sub>(i)=y<sup>^</sup><sub>n</sub>(i)-y<sub>n</sub>だけずれている可能性がある。同様に、はんだパッドの実際の寸法は、公称値からR<sup>^</sup>だけ変化している可能性がある。

【0089】同様に、はんだボール33の実際の位置は、公称値から、x方向にTx<sub>n</sub>(i)=x<sup>^</sup><sub>n</sub>(i)-

10

20

30

40

50

$x_n$ 、 $y$ 方向に $T_{y_n}(i) = y_n(i) - y_n$ だけずれている可能性がある。

【0090】幾何学的な理由から、 $i$ 番目のはんだパッド13とはんだボール33の対の位置ずれは、次式によって与えられる。

【数23】ただし、このずれの値は、上記の2段モンテカルロ・シミュレーションによって決定され、組み合わせられる。すなわち、はんだパッド13のずれの値 $T_x$

( $i$ ) および $T_y(i)$ を、あるシミュレーションで決定し、はんだボール33のずれの値 $T_x(i)$ および $T_y(i)$ を、もう1つのモンテカルロ・シミュレーションで決定し、その後、別のモンテカルロ・シミュレーションで、 $i$ 番目のはんだパッド／はんだボール対についてこれらの値を上記のように組み合わせる。

#### 【0091】例2

図5、図6、図7および図8は、本発明の方法の電子回路実装への応用を示す図である。自縛ファスナを図5に\*

$[(T_x(i)_n - T_x(i)_n)^2 + (T_y(i)_n - T_y(i)_n)^2]^{1/2}$  1万例に対して使用する。その結果を図7に示し、型締力圧力のヒストグラムを図8に示す。この結果によれば、型締力能力指数は、 $C_p = 1.274$ と $C_{pk} = 1.238$ である。この結果は、 $C_p \geq 2.0$ かつ $C_{pk} \geq 1.5$ という“6 $\sigma$ ”要件には全く不十分である。欠陥レベルは102ppmであるが、これは、3.4ppmという“6 $\sigma$ ”欠陥レベルをはるかに超えている。本発明の方法は、部品を製造する際に、より狭い公差を維持しなければならないことを示している。

#### 【0094】2段モンテカルロ公差設定の効用

本発明の多段法は、分離した自立式の公差設定工具として使用できる。また、これをCAD/CAMシステム、CIM（コンピュータ統合製造）システムとして別のシステムに組み込むこともできる。

【0095】本発明の方法は、2段モンテカルロ・シミュレーションを弾性特性の公差設定に使用する上記の例2のように、幾何的な特性やパラメータ以外の特性またはパラメータの公差設定に使用することができる。したがって、本発明の方法は、アセンブリの部品の機械的のはめ合いパラメータや、回路要素の抵抗、キャパシタンス、インダクタンスや、記憶装置内のメモリ・チップの速度など、あるシステムの熱的、弾性的、電気的パラメータ、さらにデジタルのはめ合いパラメータの公差設定に使用することができる。

#### 【0096】

$$P = \frac{4Et^3f(D-d)}{D^3}$$

ることを意味する。

【0097】本発明の多数モンテカルロ・モデル化法では、モンテカルロ技法を使用して、まずアセンブリ内の個々の部品の時間依存性およびスループット依存性の変

\*示す。このファスナは、型締力を提供する一体式のばね座金を含んでいる。組み立てた時、このファスナは、アセンブリに対して4.448N（1ポンド）の型締力を提供しなければならない。このファスナは、成形プラスチックから作られ、ばね座金は、ハウジングとファスナの上限に対処できるように選択される。ばね座金の機能は、短いファスナを薄いアセンブリにはめ合わせる時に掛かりを確保することである。

【0092】第1近似として、所与のたわみに対してこのばね座金によって発生される力は、次式で与えられる。

【数24】ただし、 $f = (A+B) - C$ 、 $P$ は型締力、 $E$ はファスナ材料の弾性率、 $t$ は座金の厚さ、 $D$ は座金の外径、 $d$ は座金の内径、 $C$ は座金から掛かり点までの距離、 $A$ はスプリング・ハウジングの厚さ、 $B$ は回路ボード・スチフナの厚さである。

$[(T_x(i)_n - T_x(i)_n)^2 + (T_y(i)_n - T_y(i)_n)^2]^{1/2}$  動公差を分析し、モデル化する。次に第2段で、モンテカルロ分析を使用して、第1のモンテカルロ・シミュレーションでモデル化された個々の部品の集合から、個々の部品をランダムに選択し、最終アセンブリ公差を非線形モデル化する。

【0098】特定の好ましい実施例および例に関して本発明を説明してきたが、それによって本発明の範囲を制限するものではない。

#### 【0099】

【発明の効果】本発明の多数モンテカルロ法を使用することによって、個々の部品の分散の源を分析してその結果得られる個々の部品の分散をモデル化し、個々の部品の分散データを使用して完成アセンブリのはめ合いと公差設定の分布をモデル化することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】「従来技術」による標準分布曲線を表し、その曲線の形状、平均値、平均値からの「標準偏差」の関数としてのその曲線の下側の面積を示す図である。

【図2】やはり「従来技術」による、製造ランの初期の平均値と分布を示す曲線と、1製造ランの後の平均値と分布を示す曲線の、2つの標準分布曲線を表す図である。

【図3】やはり「従来技術」による、図2のずれたまたは調節された分布曲線を表し、ずれたまたは調節された平均値と標準偏差を示す図である。

【図4】はんだパッドと、はんだパッド位置決め用の1対のX-Y格子と、公差設定の対象となる変数の名前を含む、本発明の公差設定方法を例示するために使用した集積回路チップおよび超小型電子回路パッケージを示す図である。

【図5】本発明の公差設定方法を例示するために使用した、ファスナ／コネクタ・ハウジング・アセンブリの横

断面を示す図である。

【図6】図5のファスナ／コネクタを解析するために本発明のモンテカルロ分析方法に与えられる入力をまとめた図である。

【図7】図5のファスナ／コネクタのモンテカルロ・シミュレーションからの出力をまとめた図である。

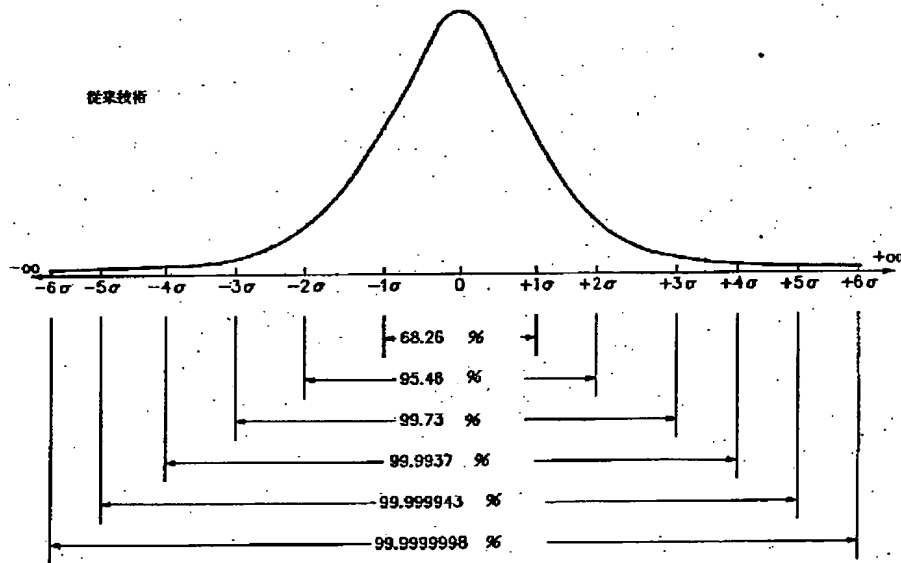
【図8】図5のファスナ／コネクタのばね座金の型締力

の分布のヒストグラムを示す図である。

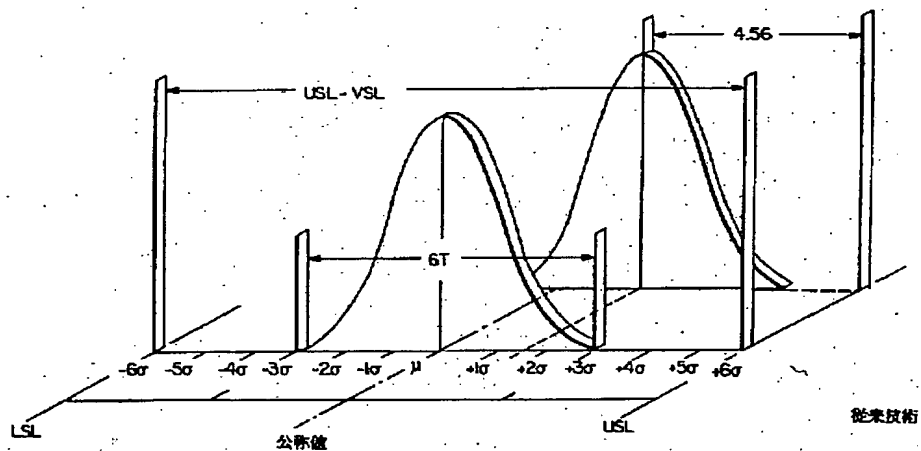
【符号の説明】

- 1 超小型電子回路パッケージ
- 1 1 基板
- 1 3 はんだパッド
- 3 1 集積回路チップ
- 3 3 はんだボール

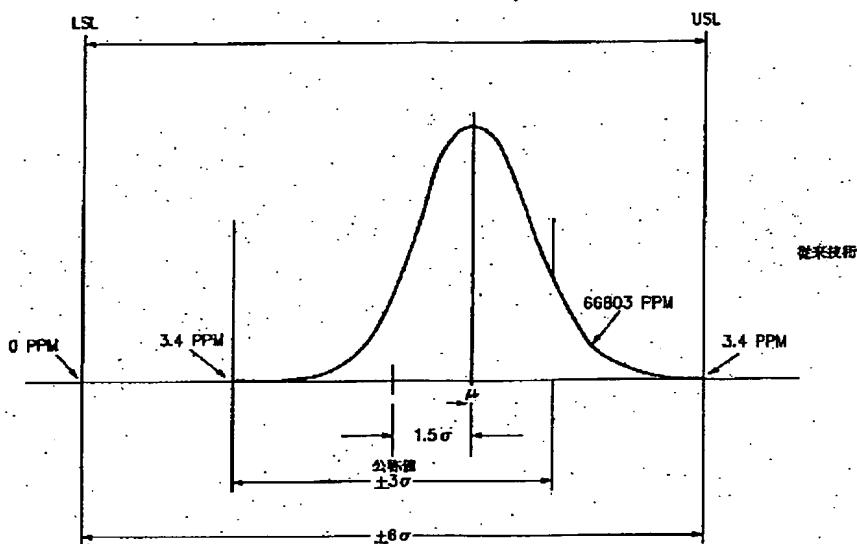
【図1】



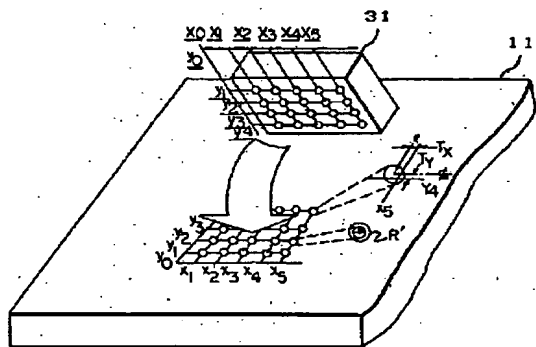
【図2】



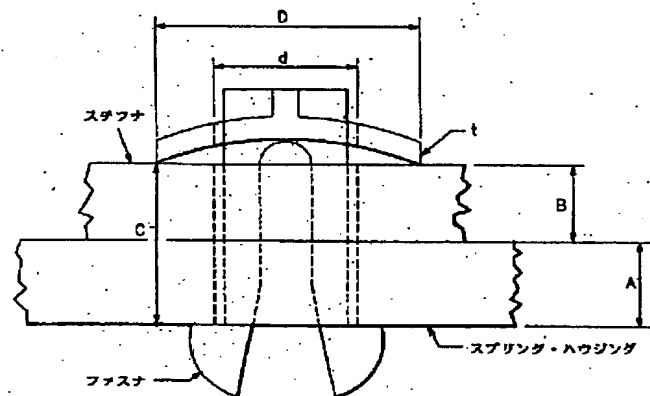
【図3】



【図4】



【図5】



【図6】

特徴	シフト	寸法	$C_p$	$C_{pk}$
E 動的	DYNAMIC	$3000 \pm 300 \text{ N/mm}^2$	1.33	1.0
t 静的	STATIC, $V = +1$	$1.1 \pm 0.05 \text{ mm}$	2.0	1.5
D 静的	STATIC, $V = -1$	$11.0 \pm 0.13 \text{ mm}$	2.0	1.5
d 静的	STATIC, $V = +1$	$7.6 \pm 0.13 \text{ mm}$	2.0	1.5
D 静的	STATIC, $V = -1$	$7.27 \pm 0.05 \text{ mm}$	2.0	1.5
A 動的	DYNAMIC	$4.0 \pm 0.02 \text{ mm}$	1.5	1.0
B 動的	DYNAMIC	$3.7 \pm 0.13 \text{ mm}$	1.0	0.5

モンテカルロ・シミュレーションに対する入力まとめ

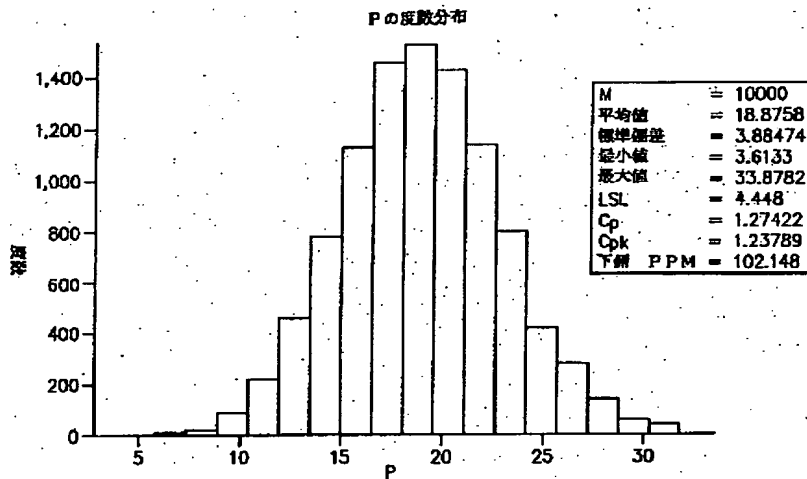


【図7】

特徴	$\mu$	$\sigma$	最小	最大
E [N/mm <sup>2</sup> ]	3299.5	99.89	2917.9	3696.7
t [mm]	1.112	0.0083	1.079	1.142
D [mm]	10.968	0.0217	10.878	11.051
d [mm]	7.633	0.0213	7.554	7.708
C [mm]	7.258	0.0085	7.227	7.289
A [mm]	4.000	0.0058	3.975	4.026
B [mm]	3.701	0.0871	3.351	4.020
P [N]	18.876	3.885	3.613	33.879

モンテカルロ・シミュレーションの出力のまとめ

【図8】



## 【手続補正書】

【提出日】平成4年10月22日

## 【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】発明の詳細な説明

【補正方法】変更

【補正内容】

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、アセンブリの部品や、回路要素の抵抗、キャパシタンス、インダクタンスや、さらには記憶装置内のメモリ・チップの速度など、システムのパラメータの公差設定に関する。具体的に言う

と、本発明は、部品の機能要素の統計測定値が、時間不変量ではなく、1製造ランの間に变化するという認識に基づくものである。すなわち、部品機能要素測定値の平均値、および時間依存平均に関する部品機能要素測定値の標準偏差は、1製造ランの間にもさらにはラン間でも一定ではない。製品機能要素の寸法の測定値、すなわち、平均値、標準偏差および工程能力指数はすべて、時間の経過に伴って变化する。時間の経過に伴う機能要素寸法のこの変化に対処するため、平均値および標準偏差、さらにこれらを介して製造能力を、数学的に「シフト」または「調節」する。

【0002】本発明によれば、これらの「シフト」また

は「調節」されたパラメータ群を、モンテカルロ・シミュレーションで使用して、各出力分布の個々の点  $x$

( $i$ )、 $y$  ( $i$ )、 $z$  ( $i$ ) の離散値を決定する。モンテカルロ・シミュレーションの後続ステップで、個々のアセンブリの最終はめ合い (fit) のために、出力分布の個々の点  $x$  ( $i$ )、 $y$  ( $i$ )、 $z$  ( $i$ ) を組み合わせる。その後、個々のアセンブリ最終はめ合いの統計値を製造仕様と比較する。

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

ただし、この分布は、直接代入によってモデル化される。すなわち、分布  $F$  は、下記の直接代入によってモデル化される。

$$F(1) = F[x(1), y(1), z(1)]$$

$$F(2) = F[x(2), y(2), z(2)]$$

...

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

...

$$F(n) = F[x(n), y(n), z(n)]$$

#### 【0004】

##### 【従来の技術】

##### 1. 電子回路パッケージ

電子パッケージ用の一般的な構造と製造工程は、電子パッケージの組立てにポジティブ・フォトレジストを使用することを含めて、たとえば、ドナルド・セラフィム

(Donald P. Seraphim)、ロナルド・ラスキ (Ronald Lasky) およびチェヨ・リー (Che-Yo Li) 著、Principles of Electronic Packaging, McGraw-Hill Book Company, New York New York (1988) や、ラオ・トゥマラ (Rao R. Tummala) およびユージン・リャマシエフスキ (Eugene J. Rymaszewski) 著、Microelectronic Packaging Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, New York (1988) に記載されている。これらの文献を、引用によって本明細書に合体する。

【0005】セラフィム他およびトゥマラ他が記述するように、電子回路には、多数の個別電子回路部品、たとえば、数千個ないし数百万個の個別の抵抗、コンデンサ、インダクタ、ダイオード、トランジスタが含まれる。これらの個別回路部品を相互接続して回路を形成し、個々の回路をさらに相互接続して、機能ユニットを形成する。電力と信号の分配は、これらの相互接続を介して行われる。個々の機能ユニットには、機械的な支持と構造的な保護が必要である。電子回路が機能するためには電気エネルギーが必要であり、機能状態に保つためには熱エネルギーを除去する必要がある。チップ、モジュール、回路カード、回路ボードおよびこれらの組合せなどの超小型電子パッケージが、回路部品および回路の保護、収納、冷却および相互接続に使用される。

【0003】組立済み部品の最終はめ合い分布は、関数  $F$  によって変数モデル化される。 $F$  は、個々の部品の寸法分布  $x$ 、 $y$ 、 $z$  の関数  $F[x, y, z]$  である。 $F$  の分布は、下記の関数のモンテカルロ・シミュレーションによって与えられる。

【数1】

【数2】

【0006】単一の集積回路内では、回路部品間および回路間の相互接続、熱放散および機械的保護は、集積回路チップによってもたらされる。このチップを、「第0」実装段と称し、そのモジュール内に収納されたチップを、第1の実装段と称する。

【0007】実装には、少なくとももう1つのレベルがある。この第2の実装レベルが、回路カードである。回路カードは、少なくとも4つの機能を実行する。第1に、回路カードが使用されるのは、所望の機能を実行するのに必要な全回路またはビット・カウントが、第0段および第1段パッケージ、すなわちチップおよびチップ・モジュールのビット・カウントを上回るからである。第2に、回路カードは、他の回路要素との信号相互接続を提供する。第3に、第2段パッケージすなわち回路カードは、第1段パッケージすなわちチップまたはモジュールに簡単には集積できない部品用の位置を提供する。これらの部品には、たとえば、コンデンサ、精密抵抗、インダクタ、電気機械式スイッチ、光カプラなどが含まれる。第4に、第2段パッケージに取り付けることによって、チップおよびモジュールの熱管理、すなわち、熱放散が実現される。パッケージの主目的が、電氣的相互接続であることに変わりはない。

##### 【0008】2. 実装密度と製造公差

過去には、パッケージは、システム性能を決定する因子ではなかった。ところが、集積回路の開発が急速に進歩したため、役割が入れ換わる結果になった。したがって、バコグル (H. P. Bakoglu) 著 Circuits, Interconnections, and Packaging for VLSI, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. (1990) p. 81 によれ

ば、「現在、ハイエンド・コンピュータの全システム遅延の50%が、実装遅延に帰因するものであり、この実装の寄与率は、2000年には80%まで上昇する可能性がある」。

【0009】このため、パッケージ開発者達は、システム性能に対する悪影響を最小にするため、パッケージの寸法を縮小しなければならないという必要に強く迫られている。これは、チップを互いに接近して配置しなければならないことを意味する。さらに、個々のチップの回路密度が増加するにつれて、パッケージの相互接続密度もそれに応じて増加させる必要がある。相互接続密度が増加すると、配線やパイアなど、パッケージ機能要素の寸法を縮小することが必要になる。寸法を縮小するには、寸法が縮小される機能要素に対する公差をますます小さくする必要がある。

### 【0010】3. 「6σ」パラダイム

寸法縮小が行われるようになるのは、商売上の競争が激化し、費用を低く保ちながら品質と性能を高く保たなければならない時である。これは、欠陥レベルをできる限り低く保たなければならないことを意味する。欠陥レベルの尺度の1つが、「6σ」のエンジニアリングおよび製造である。「6σ」パラダイムの下では、欠陥レベルが、3.4 ppm未満に保たれる。これは、実質的にすべての部品、すなわち、百万個のうちの少なくとも999996.6個の部品が、仕様通りに機能しなければならないことを意味する。

【0011】「6σ」パラダイムの要求に合致するには、堅牢な製品の設計および製造工程を達成する並行した設計および製造エンジニアリングが必要である。この製品設計は、自然的に発生する変動に対して堅牢でなければならない。この製造工程は、製造を仕様の範囲内に保つ工程制御を実施しなければならない。

【0012】相乗的に相互作用して「6σ」要件を満たす設計と工程を生み出す方法は、たとえば、マイケル・ハリー (Mikel J. Harry) およびリーグル・スチュワート (Reigle Stewart) 著 Six Sigma Mechanical Design Tolerancing, Motorola, Inc., (1988) に記載されており、この文献を引用によって本明細書に合体する。

「6σ」とは、機械公差設定のレベルである。機械公差設定とは、あるアセンブリに含まれる部品の個々の部品の機械的パラメータが、その公称値から変動し得るが、それでもなお許容できるアセンブリをもたらす範囲を決定することである。

### 【0013】4. 統計的背景

統計的公差分析は、ハリーおよびスチュワートによれば、製造仕様を超える場合の数学的な確率の計算とその後の分析であると定義される。製造可能な部品を設計する際には、機械公差が製造能力と関係付けられる。

【0014】公差設定は、古典的統計学に基づく。したがって、部品のあらゆる母集団が、次式によって定義さ

れる算術平均または「平均値」を有する。

【数3】

$$\mu = \left( \sum_{i=1}^N X_i \right) / N$$

ただし、μは、算術平均または「平均値」である。また、部品のあらゆる母集団は、次式によって定義される、平均値からの散乱または逸脱の尺度、すなわち「標準偏差」を有する。

【数4】

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2 / N}$$

ただし、σは、標準偏差であり、X<sub>i</sub>は、アセンブリ内のi番目の部品の測定値である。

【0015】正規分布の母集団のうちで平均値から指定された数の標準偏差以内（またはそれを超える範囲）に含まれる部分の比率は、標準的な研究資料でグラフまたは表にまとめられている。このようなグラフの1つをハリーおよびスチュワートから引用し、図1に示す。このグラフでは、母集団中の比率が縦軸に、平均値から外向かう正負両方の標準偏差が横軸に示されている。任意の2つの標準偏差x<sub>1</sub>とx<sub>2</sub>の間にある母集団は、x<sub>1</sub>からx<sub>2</sub>までの区間での高さyの定積分に等しい。すなわち、正規分布の母集団の68.4%が、平均値から±1σ（標準偏差）以内にあり、正規分布母集団の95.5%が、平均値から±2σ以内にあり、正規分布母集団の99.73%が、平均値から±3σ以内にある。正規分布母集団の場合、母集団の約3.4 ppmが、平均値から±4.5σの外側にある。

【0016】図1に示すように、平均値から±1σの範囲におさまる、母集団の68.4%の寸法範囲は、次式によって与えられる。

【数5】

$$(-1\sigma) \leq X_i \leq (+1\sigma)$$

一方、平均値から±2σの範囲におさまる、母集団の95.46%の寸法範囲は、次式によって与えられる。

【数6】

$$(-2\sigma) \leq X_i \leq (+2\sigma)$$

【0017】これは、「6σ」基準の下では、たとえば時間の経過に伴って、または製造ラン間で平均値が1.5σだけシフトする時に、製造された百万個の部品のうちの3.4個だけが、次式によって与えられる寸法範囲の外にあることを意味し、

【数7】

$$(-4.5\sigma) \leq X_i \leq (+4.5\sigma)$$

母集団平均値から $\pm 4.5\sigma$ の範囲内にある個々の部品がすべて、満足な性能をもたらすことを意味する。

【0018】所与の機械公差を達成する能力を定義するのに使用される性能指数の1つが、「能力指数」である。この指数は、次式によって定義される。

【数8】

$$C_p = (USL - LSL) / 6\sigma$$

ただし、USLは、ある部分の寸法の上限、LSLは、その部分の寸法の下限である。

【0019】 $C_p$ と、それを定義する項、USL、LSLおよび $\sigma$ （標準偏差）を、やはりハリーおよびスチュワートから引用して図2に示す。図2は、2つの標準分布曲線を示す図であり、分布1は、公称仕様を中心とし、分布2は、平均値から $1.5\sigma$ だけシフトしている。上限USL、下限LSLおよび公称値 $\mu$ が、同図に示されている。距離USL-LSLと、 $\pm 3\sigma$ の広がり、図2に示され識別されている。

【0020】能力指数 $C_p$ が2.0の母集団について検討する。これは、仕様幅USL-LSLが、 $6\sigma$ の分布範囲の2倍の大きさであることを意味する。これは、USLからLSLまでの個々の部品の最大製造公差が、平均値から $\pm 3\sigma$ 以内の個々の部品の母集団の2倍の幅であることを意味する。製造ランに関するパラメータに変化がないと仮定すると、これは、能力指数 $C_p$ が2.0を超えるすべての時間不変処理で「 $6\sigma$ 」基準が満たされることを意味する。

#### 【0021】5. 統計測定値の時間分散

製造工程は、時間不変量ではないことが知られている。公差の時間依存性に関連する能力指数が存在する。これが $C_{pk}$ であり、次式で定義される。

【数9】

$$C_{pk} = C_p(1-k)$$

ただし、kは、次式で定義される。

【数10】

$$k = \frac{|\text{公称値} - \text{平均値}|}{(USL - LSL) / 2}$$

【0022】統計的平均は、一定ではなく、変数である。歴史的には、これはスループットに依存する。kは、時間またはスループットに依存する、新しい平均値の公称値からの移動の測定値である。「 $6\sigma$ 」能力とは、製造ランの過程を通じて統計平均値が大きくシフトした場合、たとえば、平均値が $1.5\sigma$ のシフトした場合でも、その工程で製造される百万個の部品のうち許容

できない部品が3.4個しかないことを意味する。

【0023】図2の条件2「分布平均が公称値から $1.5\sigma$ シフトした場合」に、新しい条件が示されている。新しい分布の平均値は、右に $1.5\sigma$ だけずれており、kは、 $|1.5\sigma| / 3\sigma$ すなわち0.5であり、 $C_{pk}$ は、1.50である。

【0024】ここでやはりハリーおよびスチュワートから引用した図3を参照すると、ずれがある場合でも、個々の部品のうち公称平均値から $-6\sigma$ を超える（ずれた平均値から $7.5\sigma$ を超える）部分は、實際上0であり、個々の部品のうち公称平均値から $6\sigma$ を超える（ずれた平均値から $4.5\sigma$ を超える）部分は、3.4ppmである。これは、 $6\sigma$ 能力係数と機能的に等価である。

#### 【0025】6. アセンブリ設定

上述したように、最終アセンブリ公差または合成公差が3.4ppm未満の欠陥レベルという機能要件を満たすように、個々の部品および特徴の公差を制御しなければならない。最終アセンブリ用の部品の公差設定のために、様々な方法が知られている。

#### 【0026】a. 最悪条件公差設定

そのような公差設定方法の1つが、「最悪条件公差設定」である。最悪条件公差設定では、個々の部品が、完成アセンブリを機能しない状態にするように選択された許容範囲の端にあると仮定する。「最悪条件」モデルによれば、1組のインサートが、公差内の最大寸法であると仮定され、それらを受けるためのアパーチャが、公差内の最小寸法であると仮定され、完成アセンブリが、機能せずジャムを起こすことになる。

【0027】最悪条件モデルは、一般に慎重にすぎる。これは、不必要に厳格な仕様をもたらし、その結果、通常なら機能するアセンブリが捨てられる可能性がある。

【0028】最悪条件法は、締めばめまたは過度に大きな間隙の「可能性」を考慮に入れていない。ハリーおよびスチュワートが指摘するように、最悪条件分析は、工程能力とは無関係に、直線の両端だけを考慮している。

#### 【0029】b. 2乗和平方根分析

「2乗和平方根」法では、標準偏差 $\sigma$ と設計公差Tと製造能力 $C_p$ 指数の間に下記の関係がある。

【数11】

$$\sigma = T / 3C_p$$

特筆すべき点は、能力指数 $C_p$ が設計公差Tに対して相対的に増加するにつれて、標準偏差 $\sigma$ が低下することである。これは、能力指数 $C_p$ が上がるにつれて、任意の所与の間隙干渉または間隙拘束に遭遇する可能性が下がることを意味する。

【0030】2乗和平方根法は、製造能力指数を利用して、アセンブリ収率のより現実的な指標を与えるが、ス

スループットに関する工程平均値のずれを考慮に入れない。

【0031】c. 改良2乗和平方根分析

どの2乗和平方根法も、たとえばスループットなど、時間に関する個々の部品平均値寸法のずれを考慮に入れるように改良する必要がある。様々な工具を使用して、2乗和平方根分析の時間またはスループットの不変性を緩和し、2乗和平方根モデルに時間依存性またはスループット依存性の測定値を導入する。

$$Z_r = \frac{F - (N_o - \sum_{i=1}^m N_{pi})}{\sqrt{(T_o/3C_{pk})^2 + \sum_{i=1}^m (T_{pi}/3C_{pi})^2}}$$

から、

【数13】

【0032】このような工具の1つが、ハリーおよびスチュワートによって記述された静的2乗和平方根モデルである。このモデルでは、上述の関数kを利用して、個々の部品の公差に、時間依存関数またはスループット依存関数を乗じる。

【0033】これによって、2乗和平方根モデルは、  
【数12】

を介して

【数14】

$$Z_r = \frac{F - \sum_{i=1}^m N_i V_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (T_{pi}/3C_{pi})^2}}$$

$$Z_F = \frac{F - \sum_{i=1}^m (N_i + W_i k_i T_i) V_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (T_{pi}/3C_{pi})^2}}$$

に変形される。ただし、 $Z_r$ は間隙拘束または間隙限界の修正済みZ変換、 $N_o$ はアパーチャの公称寸法、 $N_i$ はインサートの公称寸法、 $T_o$ はアパーチャの設計公差、 $T_i$ はインサートの設計公差、 $C_{pk}$ はアパーチャの製造能力指数、 $C_{pi}$ はインサートの製造能力指数であり、 $k$ は前述の通り、 $W_i$ はシフト・ベクトルである。

【0034】d. 2乗和平方根に基づくモデル

2乗和平方根に基づくモデルを改良すると、最終的には最悪条件モデルまたは改良最悪条件モデルになる。したがって、他の公差設定モデルを使用することが必要になってきた。

【0035】e. モンテカルロ分析

部品公差設定にモンテカルロ分析を使用することは、たとえば、メアリ・ラウジー (Mary E. Rowzee) およびリチャード・ホームズ (Richard K. Holmes) 著 "Optimizing Component and Assembly Tolerancing", 1986- ASQC Quality Congress Transactionsに記載されている。

【0036】モンテカルロ分析とは、確率論的モデル化に基づいてアセンブリの変動を決定するのに使用される予測技法である。モンテカルロ分析は、たとえば、US

L-LSLの範囲など、個々の部品公差ごとに1つの範囲を確立することによって行われる。数学的に定義された分布にぴったりあてはまる確率抽出をこの範囲内から行って、その応答を評価する。出力値は、従来の統計的方法によって分析する。

【0037】モンテカルロ分析では、乱数発生機能を使用して分布抽出を実行する。したがって、モンテカルロ・シミュレーションでは、デジタル・コンピュータ上で多数のサンプルをシミュレートできる。

【0038】モンテカルロ分析は、2乗和平方根分析や最悪条件分析と同じく、線形法によって複雑なアセンブリを容易にまたは現実的に分析できない場合に特に有用である。

【0039】モンテカルロ分析は、完成アセンブリの製造に費用または時間を要する場合にも有用である。

【0040】f. 変動シミュレーション分析

変動シミュレーション分析とは、モンテカルロ分析を拡張したものである。これは、たとえば、メアリ・ラウジーおよびリチャード・ホームズ著 "Optimizing Component and Assembly Tolerancing", 1986- ASQC Quality Con

gress Transactions、マーク・クレイグ著“Predicting Dimensional Variation In Complex Assemblies,” Cadence, July 1989, pp. 59-61および“Avoiding Assembly Misfits,” Manufacturing Engineering, June 1990, p. 53-55に記載されている。

【0041】変動シミュレーション分析の例には、正規分布以外の分布用のデータ分析方法の組み込み、正規公差分布以外の公差分布の考案、および、統計的工程データを組み込む能力が含まれる。変動シミュレーション分析は、あるアセンブリを構成する部品の変動と運動学的特性を関係付ける際に特に有益である。

【0042】また、ラウジー他は、工具の摩耗、工程の品質低下や漂動、ロットごとの寸法のばらつき、および、供給業者間での部品のばらつきをアセンブリ設計で考慮に入れることができると報告している。この考察からは、プラントが製造できる最も狭い公差ではなく、設計において合理的に許容される広さの公差がもたらされる。

【0043】ラウジー他によって報告された変動シミュレーションのもう1つの貢献が、工程能力データ情報をアセンブリ設計に組み込むことである。この方策によって、基礎となる確率分布と分散度が評価され、シミュレーション・モデルに組み込まれる。

【0044】ライト (Wright) は、AutoCAD リリース10の変動シミュレーション分析モジュールが、モンテカルロ分析を利用して、多数部品アセンブリの多数の部品の寸法をシミュレートし、次いで、多数の多数部品アセンブリを「構築する」と報告している。構築の結果をその後分析する。

【0045】7. 既存の変動公差設定方法の欠点  
既存の変動公差設定方法の多くは、個々の部品の分散の源の分析と、個々の部品の分散のモデル化に強い。他の変動公差設定方法は、完成アセンブリのはめ合いと公差設定の現実的な分布をもたらす。しかし、まず時間依存性またはスループット依存性の部品分散をモデル化し、次に最終アセンブリ公差を非線形モデル化する、変動公差設定方法は存在しない。

【0046】

【発明が解決しようとする課題】本発明の主目的は、個々の部品の分散の源を分析し、その結果得られる個々の部品の分散をモデル化し、個々の部品の分散データを使用して、完成アセンブリのはめ合いと公差設定の分布をモデル化することである。

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

ただし、この分布は、直接代入によってモデル化される。すなわち、分布Fは、下記の直接代入によってモデル化される。

【0047】本発明の他の目的は、アセンブリ内の個々の部品の時間依存性およびスループット依存性の変動公差を分析し、その後、最終アセンブリ公差を非線形モデル化することである。非線形モデル化とは、「最悪条件」または「2乗和平方根」式のモデル以外の、統計的または確率論的モデル化技法を使用することを意味する。

【0048】本発明の他の目的は、モンテカルロ技法を使用して、アセンブリ内の個々の部品の時間依存性およびスループット依存性の変動公差を分析してモデル化し、その後、さらにモンテカルロ分析を使用して、最終アセンブリ公差を非線形モデル化することである。

【0049】

【課題を解決するための手段】本発明の上記その他の目的は、本発明の統計的公差設定方法によって達成される。部品特徴の統計的測定値は、時間不変量ではない。直径の平均値や、その平均値に関する個々の部品の直径の分散などの測定値は、1製造ランの間または製造ラン間で、時間またはスループットに依存して、場合によってはランダムに変化する。本発明の方法によれば、時間の経過に伴う特徴寸法のこの変化を考慮に入れるため、モンテカルロ・シミュレーションの際に、個々の部品特徴の平均値および標準偏差を、数学的に「シフト」または「調節」させる。これによって、製造能力がシフトする。

【0050】本発明によれば、これらの「シフト」または「調節」されたパラメータ群を、後のモンテカルロ・シミュレーションに使用して、各出力分布の個々の点  $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$  の離散値を決定する。その後、出力分布の個々の点  $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$  を組み合わせて、個々のアセンブリの最終はめ合いを得る。その後、個々のアセンブリの最終はめ合いの統計を、製造仕様と比較する。

【0051】組立済み部品のモンテカルロ・シミュレーションに使用される最終はめ合い分布は、関数Fによってモデル化される変数である。Fは、i番目のアセンブリの個々の部品の寸法分布  $x$ 、 $y$ 、 $z$  の関数  $F[x, y, z]$  である。

【0052】Fの分布は、下記の関数のモンテカルロ・シミュレーションによって与えられる。

【数15】

【数16】

$$F(1) = F[x(1), y(1), z(1)]$$

$$F(2) = F[x(2), y(2), z(2)]$$

...

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

...

$$F(n) = F[x(n), y(n), z(n)]$$

【0053】本発明の多段モンテカルロ法を使用することによって、個々の部品の分散の源を分析してその結果得られる個々の部品の分散をモデル化し、また個々の部品の分散データを使用して完成アセンブリのはめ合いおよび公差設定の分布をモデル化することができる。

【0054】本発明のモンテカルロ法では、最終アセンブリ公差を非線形モデル化する。非線形モデル化とは、「最悪条件」または「2乗和平方根」式のモデル以外の、統計的または確率論的モデル化技法を使用することを意味する。

【0055】本発明の多段モンテカルロ・モデル化法では、モンテカルロ技法を利用して、まずアセンブリ内の個々の部品の時間依存性およびスループット依存性の変動公差を分析し、モデル化する。その後、第2段階で、モンテカルロ分析を使用して、第1のモンテカルロ・シミュレーションでモデル化された個々の部品の集合から、個々の部品をランダムに選択し、最終アセンブリ公差を非線形モデル化する。

【0056】本発明は、本明細書に添付の図面を参照することによって、より完全に理解されよう。

【0057】

【実施例】「シフト」または「調節」された平均値と標準偏差を用いる2段モンテカルロ・シミュレーション

本発明のモンテカルロ公差設定法では、アセンブリの個々の部品の特性を決定する能力を使用する。その後、次のモンテカルロ・シミュレーション・ステップで部品の特性を組み合わせて、アセンブリの特性を得る。

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

ただし、この分布は、直接代入によってモデル化される。すなわち、分布Fは、下記の直接代入によってモデル化される。

$$F(1) = F[x(1), y(1), z(1)]$$

$$F(2) = F[x(2), y(2), z(2)]$$

...

$$F(i) = F[x(i), y(i), z(i)]$$

...

$$F(n) = F[x(n), y(n), z(n)]$$

【0058】部品パラメータ

部品の機能要素の統計平均値は、時間不変量ではない。直径の平均値やその平均に関する個々の部品直径の分散などの測定値は、製造ランの間に、時間またはスループットに依存して変化する。本発明の方法によれば、時間の経過に伴うこの機能要素の寸法の変化を考慮に入れるため、モンテカルロ・シミュレーションの際に、個々の部品機能要素の平均値、標準偏差および製造能力指数指数を、数学的に「シフト」または「調節」させる。

【0059】アセンブリ・パラメータ

本発明によれば、これらの「シフト」または「調節」されたパラメータ群を、後のモンテカルロ・シミュレーションに使用して、各出力分布の個々の点 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の離散値を決定する。その後、出力分布の個々の点 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ を組み合わせ、個々のアセンブリの最終はめ合いを得る。その後、個々のアセンブリの最終はめ合いの統計を、製造仕様と比較する。

【0060】組立済み部品のモンテカルロ・シミュレーションに使用される最終はめ合い分布は、関数Fによってモデル化される変数である。Fは、i番目のアセンブリの個々の部品の寸法分布 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の関数 $F[x, y, z]$ である。

【0061】Fの分布は、下記の関数のモンテカルロ・シミュレーションによって与えられる。

【数17】

【数18】

【0062】個々の部品パラメータ $x$ 、 $y$ 、 $z$ の値と、その個々のサンプル値 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ に

は、調節済みの平均値と調節済みの標準偏差を利用する。個々の部品の調節済みの平均値および調節済みの標準偏差の計算は、「従来の技術」で説明した。

#### 【0063】動的平均値シフト

上述したように、動的2乗和平方根法で使用される動的平均値のシフトは、次式に従って標準偏差を調節することによって、ランダムな変動およびスループット依存性の変動を考慮に入れたものである。

【数19】

$$\mu_{adj} = \text{公称値} = (USL + LSL) / 2$$

ただし、 $\mu_{adj}$ は調節済みの標準偏差、USLとLSLは上記と同様である。

【0065】これによって、ランダムな変動やスループット依存性の変動など、工程平均の変動を考慮に入れるため、分布の広がりを増加させる。

#### 【0066】静的平均値シフト

それとは対照的に、ハリーおよびスチュワートの静的平

$$\mu_{adj} = \text{公称値} + [V(C_p - C_{pk})] / 2C_p$$

ただし、Vは、平均値シフトの方向を示すシフト・ベクトルである。その後、次式に従って標準偏差を計算する。

【数22】

$$\mu_{adj} = (USL - LSL) / 6C_p$$

【0067】静的平均値シフトでは、持続的な平均値シフトを考慮に入れるため、分布の位置をシフトさせる。

#### 【0068】個々の部品の分布の生成

どちらの方法でも、調節済みの標準偏差と調節済みの平均値を使用して、各入力変数の乱数正規分布を生成する。これは、確立された分布を生成するルーチンを使用して行われる。

#### 【0069】アセンブリ分布の生成

入力変数と出力変数の関係を記述するモデル式を使用して、各出力分布の離散値を計算する。

#### 【0070】擬似コード

下記の擬似コードの例は、出力変数を計算する方法の例である。

```
for each Input_Variable
  if Type = DYNAMIC then
    Mean = (USL + LSL)/2
    Std_Dev = (USL - LSL)/6Cpk
  end-if
  if Type = STATIC then
    Mean = [(USL + LSL)/2][1+V(1-Cp/Cpk)]
    Std_Dev = (USL - LSL)/6Cp
  end-if
  for i=1 to Sample_Size
    標準正規偏差(Z)を計算する
    Input_Variable[i] = Mean + Z * Std_Dev
  end-for
```

$$\mu_{adj} = (USL - LSL) / 6C_{pk}$$

ただし、 $\mu_{adj}$ は調節済みの標準偏差、USLは前述の分布の上限、LSLは前述の分布の下限である。

【0064】調節済みの平均値は、下記の公称値に等しい。

【数20】

均値シフトを採用してモンテカルロ環境で動作させることもできる。静的平均値シフトは、次式に従って平均値を調節することによって、スループット依存性のシフトおよびずれを考慮に入れるものである。

【数21】

$$C_{pk} = (USL - LSL) / 2C_p$$

for each Model\_Equation

for i=1 to Sample\_Size

モデル式を評価する

end-for

end-for

for each Output\_Variable

Mean, Std\_Dev, C<sub>p</sub>, C<sub>pk</sub>および

欠陥率の推定値を計算する

end-for

【0071】上記の擬似コードに含まれる入力変数は、次の通りである。

C<sub>p</sub> 各入力変数に対する工程能力

C<sub>pk</sub> 平均値を公称値から変化させる変動の源を考慮に入れた、各入力変数に対する工程能力

LSL 各入力変数の分布の下限

USL 各入力変数の分布の上限

Type 各入力変数についてそれぞれ、分布平均値のシフトが“Dynamic(動的)”であるか“Static(静的)”であるかを示す変数

Vector 静的シフトの場合に、平均値が正方向にシフトされる(Vector = 1)のか、負方向にシフトされる(Vector = -1)のかを示す変数

Model\_Equation 各モデル式について、その式を表す文字列。この式は、Expression\_Evaluator(式評価機能)の入力として使用される。

Sample\_Size 変数ごとに生成されるサンプルの数

【0072】出力変数は次の通りである。

Input\_Variable 各入力変数について、生成されるサンプル点を保持する実数値の列。

Output\_Variable 各出力変数について、生成されるサンプル点を保持する実数値の列。

【0073】上記の擬似コードでは、下記の局所変数が



使用される。

```
i          forループ・カウンタ
Z          Standard_Normal_Deviate_Generator
(標準正規偏差生成)
ルーチンから戻る際に、ランダムに生成された標準正規
偏差の値を保持する変数。
Mean      分布の上下限、工程能力および分布の
型式(静的または動的)に基づいて計算される分布の平
均值。
Std_Dev   分布の上下限、工程能力および分布の
型式(静的または動的)に基づいて計算される分布の標
準偏差。
```

【0074】上記の擬似コードによって記述される方法では、2つの標準ルーチンを利用している。一方のルーチンは、標準正規偏差生成機能であり、他方は、式評価機能である。

【0075】標準正規偏差生成機能では、このルーチンと呼び出すたびに、ランダムに発生される値が作成され、この値が標準分布に写像される。標準正規分布とは、平均値が0に等しく、標準正規偏差が1に等しいガウス分布を意味する。もちろん、本発明のモンテカルロ法では他の生成機能と共に他の分布も使用できることを理解されたい。

【0076】式評価機能は、呼出しに含まれる数式によって指定された計算の結果を生成する。本発明のモンテカルロ法は、式評価機能の選択とは独立に機能する。

【0077】この擬似コードで特に留意すべき点は、このモンテカルロ・シミュレーションが2段シミュレーションであり、第1段では部品特性、すなわち、前の議論では $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の分布を評価し、第2段ではアセンブリ特性、前の議論では $F(x(i), y(i), z(i))$ を評価することである。

【0078】このモンテカルロ・シミュレーションの第1段には、下記のループが含まれる。

```
for each Input_Variable
if Type = DYNAMIC then
Mean = (USL + LSL)/2
Std_Dev = (USL - LSL)/6Cpk
end-if
if Type = STATIC then
Mean = [(USL + LSL)/2][1+V(1-Cp/Cpk)]
Std_Dev = (USL - LSL)/6Cp
end-if
for i=1 to Sample_Size
標準正規偏差(Z)を生成する
Input_Variable[i] = Mean + Z * Std_Dev
end-for
```

一方、このモンテカルロ・シミュレーションの第2段には、下記のループが含まれる。

```
for each Model_Equation
```

```
for i=1 to Sample_Size
```

```
モデル式を評価する
```

```
end-for
```

```
end-for
```

また、第2段では、下記の結果がループによって報告される。

```
for each Output_Variable
```

```
Mean, Std_Dev, Cp, Cpkおよび
```

```
欠陥率推定値を計算する
```

```
end-for
```

#### 【0079】工程の記述

本発明の2段モンテカルロ組立公差設定方法は、インサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ を有する多数部品アセンブリの組立に特に有用である。インサート部品は、たとえば遊星歯車などのかみあう歯車でよい。また、表面実装装置に挿入する集積回路チップのピンや、回路カードまたは回路ボード上の表面パッドに接着する集積回路チップでもよい。

【0080】インサート部品は、事前に設定された組立はめ合い公差 $F(x, y, z)$ の範囲内で設置、挿入、接着または接合しなければならない。前記インサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ はそれぞれ、はめ合い決定パラメータ群を有する。すなわち、これらのパラメータの相互作用で、適当なはめ合い、機械的干渉、または大き過ぎる間隙が生じるか否かが決まる。1組のインサート部品のはめ合い決定パラメータは、平均値に関する値の分布を有する。

【0081】本発明の方法によれば、モンテカルロ・シミュレーションは、サンプル空間内の各タイプの $n$ 個1組の個々のインサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ に対して使用される。すなわち、各インサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ について、 $i=1$ からサンプル数 $n$ まで、モンテカルロ・シミュレーションを使用して、各はめ合い決定パラメータの統計的分布を生成する。この分布は、個々のインサート部品 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の各はめ合い決定パラメータについて、製造能力によって定義される上限と下限の間で、平均値とその平均値に関する偏差を有する。

【0082】個々のインサートのはめ合い決定パラメータの各組を適当に組み合わせ、多数部品アセンブリのはめ合い公差 $F(x, y, z)$ を生成する。これは、個々のインサート部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の個々の各インサート部品の適当な各はめ合い決定パラメータの数値を適当なモデルに入力することによって行われる。このモデルは、3次元CAD/CAMモデルでよい。その後、 $i$ 番目のアセンブリのモデルを使用して、 $i$ 番目の個々の多数部品アセンブリの個々のインサート部品の $i$ 番目の組 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$ の製造はめ合い公差 $F(x(i), y(i), z(n))$ を決定する。この決定は、モンテカルロ・シミュレーションによって決定される、個々のインサート部

品の  $i$  番目の組  $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$  の個々のパラメータを、 $i$  番目のアセンブリに組み合わせることに基づく。

【0083】その後、カウンタ  $i$  を増分し、サンプル空間内の個々のインサート部品の組  $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$  のそれぞれおよび各アセンブリについて、モンテカルロ・シミュレーションを繰り返す。このモンテカルロ・シミュレーションの結果を使用して、 $n$  個の多数部品アセンブリの  $i$  番目の組の公差  $F(x, y, z)$  の、適当に定義された上限と下限の間におさまる部分を決定する。

【0084】その後、 $n$  個の多数部品アセンブリの組のはめ合い公差の統計的分布を使用して、部品製造公差を設定し、あるいはアセンブリまたはそのアセンブリの個々の部品を設計し直すことができる。

#### 【0085】例

本発明の2段モンテカルロ・シミュレーションは、下記の2つの例によって理解することができる。

#### 【0086】例1

基板11と集積回路チップ31を含む超小型電子回路パッケージ1の測定値を、図4に示す。図4には、基板11上のはんだパッド13と、集積回路チップ31上のはんだボール33が、はんだパッド13とはんだボール33を位置決めするための1対の  $x$   $y$  格子と共に示されている。これらの機能要素を使用して、公差設定の対象と

$$[(Tx(i)_n - \underline{Tx}(i)_n)^2 +$$

ただし、このずれの値は、上記の2段モンテカルロ・シミュレーションによって決定され、組み合わせられる。すなわち、はんだパッド13のずれの値  $Tx(i)_n$  および  $Ty(i)_n$  を、あるシミュレーションで決定し、はんだボール33のずれの値  $\underline{Tx}(i)_n$  および  $\underline{Ty}(i)_n$  を、もう1つのモンテカルロ・シミュレーションで決定し、その後、別のモンテカルロ・シミュレーションで、 $i$  番目のはんだパッド/はんだボール対についてこれらの値を上記のように組み合わせる。

#### 【0091】例2

図5、図6、図7および図8は、本発明の方法の電子回路実装への応用を示す図である。自縛ファスナを図5に示す。このファスナは、型締力を提供する一体式のばね座金を含んでいる。組み立てた時、このファスナは、アセンブリに対して4.448 N (1ポンド) の型締力を提供しなければならない。このファスナは、成形プラスチックから作られ、ばね座金は、ハウジングとファスナの上限に対処できるように選択される。ばね座金の機能は、短いファスナを薄いアセンブリにはめ合わせる時に掛かりを確保することである。

【0092】第1近似として、所与のたわみに対してこのばね座金によって発生される力は、次式で与えられる。

#### 【数24】

なる変数を表す。

【0087】図4に示すように、各はんだパッド13は、 $x$  座標  $[x(i)_1, x(i)_2, x(i)_3, x(i)_4, x(i)_5]$  と  $y$  座標  $[y(i)_1, y(i)_2, y(i)_3, y(i)_4, y(i)_5]$  による一義的なアドレスを有する。同様に、各はんだボール33は、 $x$  座標  $[\underline{x}(i)_1, \underline{x}(i)_2, \underline{x}(i)_3, \underline{x}(i)_4, \underline{x}(i)_5]$  と  $y$  座標  $[\underline{y}(i)_1, \underline{y}(i)_2, \underline{y}(i)_3, \underline{y}(i)_4, \underline{y}(i)_5]$  による一義的なアドレスを有する。

【0088】また、図4に示すように、はんだパッド13の中心の実際の位置は、公称値から、 $x$  方向に  $Tx_n(i) = x'_n(i) - x_n$ 、 $y$  方向に  $Ty_n(i) = y'_n(i) - y_n$  だけずれている可能性がある。同様に、はんだパッドの実際の寸法は、公称値から  $R'$  だけ変化している可能性がある。

【0089】同様に、はんだボール33の実際の位置は、公称値から、 $x$  方向に  $\underline{Tx}_n(i) = \underline{x}'_n(i) - \underline{x}_n$ 、 $y$  方向に  $\underline{Ty}_n(i) = \underline{y}'_n(i) - \underline{y}_n$  だけずれている可能性がある。

【0090】幾何学的な理由から、 $i$  番目のはんだパッド13とはんだボール33の対の位置ずれは、次式によって与えられる。

#### 【数23】

$$[Ty(i)_n - \underline{Ty}(i)_n]^2]^{1/2}$$

$$P = \frac{4Et^3f(D-d)}{D^2}$$

ただし、 $f = (A+B) - C$ 、 $P$  は型締力、 $E$  はファスナ材料の弾性率、 $t$  は座金の厚さ、 $D$  は座金の外径、 $d$  は座金の内径、 $C$  は座金から掛かり点までの距離、 $A$  はスプリング・ハウジングの厚さ、 $B$  は回路ボード・スチフナの厚さである。

【0093】各寸法の限度と性能を図6に示す。次に、本明細書に記載のモンテカルロ法を1万例に対して使用する。その結果を図7に示し、型締力圧力のヒストグラムを図8に示す。この結果によれば、型締力能力指数は、 $C_p = 1.274$  と  $C_{pk} = 1.238$  である。この結果は、 $C_p \geq 2.0$  かつ  $C_{pk} \geq 1.5$  という“6 $\sigma$ ”要件には全く不十分である。欠陥レベルは102 ppmであるが、これは、3.4 ppm という“6 $\sigma$ ”欠陥レベルをはるかに超えている。本発明の方法は、部品を製造する際に、より狭い公差を維持しなければならないことを示している。

#### 【0094】2段モンテカルロ公差設定の効用

本発明の多段法は、分離した自立式の公差設定工具として使用できる。また、これをCAD/CAMシステム、CIM (コンピュータ統合製造) システムとして別のシ

システムに組み込むこともできる。

【0095】本発明の方法は、2段モンテカルロ・シミュレーションを弾性特性の公差設定に使用する上記の例2のように、幾何的な特性やパラメータ以外の特性またはパラメータの公差設定に使用することができる。したがって、本発明の方法は、アセンブリの部品の機械的はめ合いパラメータや、回路要素の抵抗、キャパシタンス、インダクタンスや、記憶装置内のメモリ・チップの速度など、あるシステムの熱的、弾性的、電気的パラメータ、さらにデジタルのはめ合いパラメータの公差設定に使用することができる。

【0096】本発明のモンテカルロ法では、最終アセンブリ公差を非線形モデル化する。非線形モデル化とは、「最悪条件」や「2乗和平方根」式のモデルではなく、統計的または確率論的モデル化技法、すなわちモンテカルロ法に基づく技法を使用することを意味する。

【0097】本発明の多数モンテカルロ・モデル化法で

は、モンテカルロ技法を使用して、まずアセンブリ内の個々の部品の時間依存性およびスループット依存性の変動公差を分析し、モデル化する。次に第2段で、モンテカルロ分析を使用して、第1のモンテカルロ・シミュレーションでモデル化された個々の部品の集合から、個々の部品をランダムに選択し、最終アセンブリ公差を非線形モデル化する。

【0098】特定の好ましい実施例および例に関して本発明を説明してきたが、それによって本発明の範囲を制限するものではない。

【0099】

【発明の効果】本発明の多数モンテカルロ法を使用することによって、個々の部品の分散の源を分析してその結果得られる個々の部品の分散をモデル化し、個々の部品の分散データを使用して完成アセンブリのはめ合いと公差設定の分布をモデル化することができる。

---

フロントページの続き

(72)発明者 ジョン・スティーヴン・クレスゲ  
アメリカ合衆国13905、ニューヨーク州ピ  
ンガムトン、ラスラップ・アベニュー 40